

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

DIPLOMSKI RAD

ROBERT HRGAR
0035128981

Zagreb, 2018

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Robert Hrgar

Zagreb, 2018

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru izv.prof. dr. sc. Ivici Garašiću na korisnim savjetima, pruženoj podršci i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se višem asistentu Matiji Bušiću, dr. sc. dipl. ing. na svim savjetima, kritikama i primjedbama koje su oblikovale ovaj rad.

Zahvaljujem svim djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava i Laboratorija za strojnu obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Robert Hrgar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ROBERT HRGAR** Mat. br.: **0035128981**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj zaštitnog plina na mehanička svojstva metala zavara dobivenog primjenom žice SG 120**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of shielding gas on mechanical properties of SG 120 wire weld metal**

Opis zadatka:

Uzevši u obzir da optimalizacija parametara pri zavarivanju čelika visoke čvrstoće zahtijeva i odabir odgovarajućeg dodatnog materijala potrebno je dati sve kriterije za izbor dodatnih materijala pri MAG zavarivanju takvih čelika. Opisati osnovne značajke zavarljivosti čelika visoke čvrstoće i objasniti utjecaj unosa topline, zaštitnog plina i sastava elektrodne žice na mehanička svojstva zavarenog spoja. Objasniti klasifikaciju dodatnih materijala sukladno normi HRN EN ISO 16834.

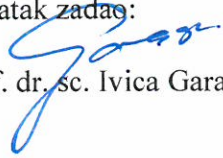
U eksperimentalnom dijelu na prikladnom osnovnom materijalu odrediti parametre zavarivanja za žicu kvalitete SG 120. Dati primjenjivo područje unosa topline i to za područje kratkih spojeva, štrcajućeg luka te pulsog prijenosa metala. U obzir uzeti više razina udjela ugljičnog dioksida u argonu. Na zavarenim uzorcima provesti ispitivanja mehaničkih svojstava metala zavara. U konačnici donijeti zaključke o prikladnosti određenog zaštitnog plina sa stanovišta operativnih parametara te postignutih mehaničkih svojstava.

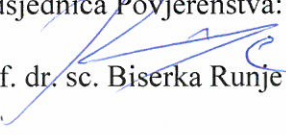
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS KRATICA

POPIS OZNAKA

SAŽETAK

SUMMARY

1. UVOD.....	1
2. ČELICI VISOKE ČVRSTOĆE.....	3
2.1. Razvoj čelika visoke čvrstoće.....	3
2.2. Čelici povišene i visoke čvrstoće.....	6
2.2.1. Mehanizmi očvrstnuća.....	6
2.2.2. Podjela čelika povišene i visoke čvrstoće.....	7
2.3. Visokočvrsti čelici.....	8
2.3.1 Podjela visokočvrstih čelika.....	8
3. ZAVARLJIVOST ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE.....	11
3.1. Pojam zavarljivosti.....	11
3.2. Ispitivanje zavarljivosti.....	11
3.2.1. Pukotine u zavaru.....	12
3.2.2. Mjere za smanjivanje opasnosti od pukotina u zavaru.....	13
3.3. Temperatura predgrijavanja.....	14
3.3.1. Funkcije predgrijavanja.....	16

3.4. Hladne pukotine.....	16
3.5. Unos toplinske energije.....	19
3.5.1. Izračun unosa topline prema normi HRN EN 1011-1.....	19
4. MAG ZAVARIVANJE.....	21
4.1. Dodatni materijal za MAG zavarivanje.....	23
4.1.1. HRN EN ISO 16834:2012.....	23
4.1.1.1. Klasifikacija prema granici razvlačenja R_e i udarnom radu loma od 47 J	24
4.1.1.2. Klasifikacija prema vlačnoj čvrstoći R_m i udarnom radu loma od 27 J.....	25
4.2. Uloga zaštitnih plinova pri MAG zavarivanju.....	26
4.3. Parametri MAG zavarivanja.....	27
4.4. Prijenos metala električnim lukom kod MAG zavarivanja.....	29
4.5. Pogreške kod MAG zavarivanja.....	32
4.6. MAG postupak zavarivanja praškom punjenom žicom.....	34
4.7. Robotizirano MAG zavarivanje.....	34
4.7.1. Općenite značajke robota.....	34
4.7.2. Podjela industrijskih robota.....	36
4.7.3. Glavne komponente robotske stanice za zavarivanje.....	36
4.7.4. Robotizirano MAG zavarivanje.....	37
5. ČELIK API 5L X80.....	40
6. EKSPERIMENTALNI RAD.....	43
6.1. Opis eksperimenta.....	43
6.2. Oblikovanje plana pokusa.....	44
6.3. Osnovni materijal.....	45
6.4. Zaštitni plin.....	45

6.5. Izrada upravljačkog programa na robotskoj jedinici ALMEGA AX - V6.....	45
6.6. Dodatni materijal.....	47
6.7. Priprema spoja.....	49
6.8. Zavarivanje ploča.....	50
6.9. Izrada ispitnih uzoraka.....	53
6.10. Statičko vlačno ispitivanje.....	57
6.11. Ispitivanje udarnog rada loma.....	61
 7. ANALIZA REZULTATA.....	63
7.1. Analiza rezultata statičkog vlačnog pokusa.....	63
7.2. Analiza rezultata udarnog rada loma.....	65
7.3. Analiza makro uzorka.....	67
 8. ZAKLJUČAK.....	70
 9. LITERATURA.....	72
 10. PRILOZI.....	75

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz utjecajnih činitelja u zavarenom spoju

Slika 2. Zavisnost parametra pukotina o temperaturi predgrijavanja

Slika 3. Hladna pukotina u ZUT-u kutnog spoja

Slika 4. Hladna pukotina iz neprovarenog korijena zavara sučeljenog spoja

Slika 5. Shematski prikaz MAG zavarivanja

Slika 6. Shematski prikaz kompletnog uređaja

Slika 7. Unutarnja regulacija visine električnog luka

Slika 8. Prikaz pronalaženja optimalne radne točke za MAG zavarivanje

Slika 9. Vremenski tok struje kod impulsnog zavarivanja

Slika 10. Pore u korijenu kod MAG zavarivanja čelika

Slika 11. Naljepljivanje između slojeva zavara

Slika 12. Uključci troske u zavarenom spoju

Slika 13. Topla pukotina u metalu zavara

Slika 14. Skretanje, poniranje i valjanje vrha manipulatora

Slika 15. Glavne komponente robotske stanice za zavarivanje

Slika 16. Robot Fanuc za elektrolučno zavarivanje

Slika 17. Struktura sustava upravljanja kod robotiziranog zavarivanja

Slika 18. Shematski prikaz robotske stanice VRC – 1G MIG + 1G TIG/1dm

Slika 19. Robotska jedinica Almega AX – V6

Slika 20. Kolut žice LNM MoNi i mehanizam za dodavanje žice

Slika 21. Priprema spoja

Slika 22. Pozicioniranje ploča za zavarivanje na podlozi

Slika 23. Redoslijed polaganja slojeva na uzorcima 1 i 3

Slika 24. Redoslijed polaganja slojeva na uzorcima 2 i 4

Slika 25. Bezkontaktni IR termometar

Slika 26. Lice zavara

Slika 27. Reduciranje širine zavarenih ploča na plinskoj rezačici

Slika 28. Plan uzimanja uzoraka prema normi HRN EN ISO 15614-1 : 2007

Slika 29. Položaj epruvete za statički vlačni pokus u metalu zavara

Slika 30. Radionički crtež epruvete za statički vlačni pokus

Slika 31. Dimenzije epruvete za ispitivanje udarnog rada loma

Slika 32. Kidalica Messphysik Beta 50-5

Slika 33. Video prikaz postupka kidanja epruvete

Slika 34. Dijagram kidanja

Slika 35. Epruvete nakon provedenog ispitivanja na kidalici

Slika 36. Namještanje ispitnog uzorka na nakovanj uređaja

Slika 37. Izmjerene i garantirana vrijednost vlačne čvrstoće

Slika 38. Izmjerene i garantirana vrijednost granice razvlačenja

Slika 39. Izmjerene i garantirana vrijednost istezljivosti

Slika 40. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Slika 41. Utjecaj parametara zavarivanja na udarni rad loma metala zavara

POPIS TABLICA

Tablica 1. Utjecaj legirnih elemenata na mehanička svojstva čelika

Tablica 2. Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka (k)

Tablica 3. Klasifikacija dodatnog materijala prema granici razvlačenja i istežljivosti

Tablica 4. Klasifikacija dodatnog materijala prema granici razvlačenja i istežljivosti

Tablica 5. Svojstva čelika API 5L X80 prema normi API 5L

Tablica 6. Uobičajeni kemijski sastav čelika API 5L X80

Tablica 7. Razine stanja pokusa

Tablica 8. Mehanička svojstva žice LNM MoNi

Tablica 9. Kemijski sastav žice LNM MoNi

Tablica 10. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja i unesene topline

Tablica 11. Shematski prikaz pozicioniranja epruvete i V-utora

Tablica 12. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Tablica 13. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Tablica 14. Poprečni presjeci zavara svih stanja pokusa

POPIS KRATICA

ZUT	Zona utjecaja topline
MZ	Metal Zavara
MAG	Metal Active Gas
TMCP	Thermo-mechanical Controlled Process
PH	Precipitation Hardening
WPS	Welding Procedure Specification
CTS	Controlled Thermal Severity
HRN	Hrvatska Norma
EN	Europska Norma
ISO	International Association of Classification Societies
MIG	Metal Inert Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
MAGM	Metal Active Gas Mixture
IR	InfraRed
CCD	Charge Coupled Device
API	American Petroleum Institute
L	Linepipe
FCAW	Flux Cored Arc Welding

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
A	Istezljivost	%
R_m	Vlačna čvrstoća	MPa
$R_{p0,2}$	Konvencionalna granica razvlačenja	MPa
R_e	Granica razvlačenja	MPa
KV	Udarni rad loma	J
U	Napon zavarivanja	V
I	Struja zavarivanja	A
v	Brzina zavarivanja	cm/min
Q	Unos topline	kJ/cm
T_0	Temperatura predgrijavanja	°C
T_{pr}	Prijelazna temperatura	°C
k	Faktor toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja	-
R_d	Dinamička čvrstoća	MPa
P_{cm}	Pukotinski parametar	-
P_w	Ekvivalent ugljika	-
d	Promjer žice	mm

SAŽETAK

U prvom dijelu diplomskog rada obrađeni su razvoj, karakteristike i podjele čelika visoke čvrstoće s posebnim naglaskom na problematiku zavarljivosti takvih čelika. Opisane su osnovne značajke zavarljivosti takvih čelika i proučen utjecaj zaštitnog plina, unosa topline i sastava dodatnog materijala na mehanička svojstva zavarenog spoja. Također, istražena je i obrađena klasifikacija dodatnih materijala pri zavarivanju čelika visoke čvrstoće sukladno normi HRN EN ISO 16834:2012.

U eksperimentalnom dijelu opisan je MAG postupak zavarivanja čelika API 5L X80 elektrodnom žicom LNM MoNi, kao i postupci ispitivanja, te analiza dobivenih rezultata. Planom pokusa definirane su dvije ulazne varijable, unos topline i vrsta zaštitnog plina, sa varijacijom na dvije razine. Provedeno je ispitivanje mehaničkih svojstava metala zavara statičkim vlačnim pokusom i ispitivanjem udarnog rada loma na Charpyjevom batu, kao i analiza makro uzorka.

Eksperimentalni dio diplomskog rada proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu.

Ključne riječi: čelici visoke čvrstoće, statičko vlačno ispitivanje, udarni rad loma, metal zavara.

SUMMARY

The first part of the thesis deals with the development, characteristics and division of high strength steel with special emphasis on the problem of welding of such steel. The basic features of welding of such steel and the influence of protective gas, heat intake and the composition of the additional material on the mechanical properties of the welded joint are described. Also, the classification of additional materials for the welding of high strength steel in accordance with HRN EN ISO 16834: 2012 has been investigated and processed.

The experimental section describes the MAG welding process of API 5L X80 LNM MoNi electrode wire as well as the test procedures and analysis of the obtained results. The experiment plan defined two input variables, heat inputs and types of protective gas, with two-level variation. An examination of the mechanical properties of weld metal by static tensile testing and examination of the impact toughness at Charpy's pendulum was carried out as well as a macro sample analysis.

The experimental part of the thesis was conducted in the laboratories of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb.

Key words: high strength steel, static tensile testing, impact toughness, weld metal.

1. UVOD

Primjena visokočvrstih čelika omogućuje izgradnju lakših konstrukcija u transportnoj opremi, te u proizvodnji ostale strojarske opreme i konstrukcija. Uz pomoć lakših konstrukcijskih elemenata inženjeri mogu povećati nosivost strojeva i poboljšati njihovu učinkovitost. Međutim, problemi nastaju zbog postizanja lošijih mehaničkih svojstava u zavarenom spoju nego što su u osnovnom materijalu, a uzrokovanih zavarivačkim toplinskim ciklusom. Radi prethodno navedenog posebno se razvija tehnologija zavarivanja s vrlo niskim unosom topline, čime se postižu bolja mehanička svojstva u zavarenom spoju.

U industriji koja obuhvaća planiranje i projektiranje tehnologije zavarivanja, zavareni spojevi su kritičan čimbenik pouzdanosti konstrukcije. Za osiguravanje nužnih propisanih zahtjeva zavarenog spoja vrlo je važna kontrola unesene topline. Prevelik unos topline uzrokuje povećanje tvrdoće u zoni utjecaja topline (ZUT-u), što rezultira smanjenim udarnim radom loma i nižom čvrstoćom, dok premali unos topline povećava opasnost od pojave grešaka vezivanja. Pri zavarivanju tankih ploča iz visokočvrstih čelika nije propisana minimalna vrijednost za unesenu toplinu. Međutim, problemi se javljaju pri prevelikim unosima topline, jer prevelik unos topline djeluje degradirajuće na mehanička svojstva materijala. Manji unos topline može se postići, između ostalog, izborom MAG postupka zavarivanja impulsnom strujom.

Povećanje čvrstoće čelika, uz istovremenu uštedu legirajućih elemenata, ostvaruje se primjenom postupka mikrolegiranja, a koristi prvenstveno kod izrade konstrukcijskih čelika koje karakterizira visoka granica razvlačenja, zadovoljavajuća plastičnost, neznatna sklonost krhkom lomu, te dobra zavarljivost. Za sve moderne visokočvrste zavarljive čelike karakteristično je da su mikrolegirani s niobijem, vanadijem, titanijem ili nekim drugim mikrolegirajućim elementom. Razlika u odnosu na uobičajen sastav konstrukcijskih čelika je u relativno niskom sadržaju ugljika i dodatku mikrolegirajućeg elementa. Sadržaj mikrolegirajućeg elementa u takvom čeliku iznosi 0,01 – 0,1 %, a sadržaj ugljika je vrlo nizak i iznosi 0,02 – 0,2 %. Mikrolegirajući elementi ne mijenjaju osnovnu vrstu čelika, što znači da nelegirani čelik ostaje nelegiran, a niskolegiran ostaje i dalje niskolegiran. Čelici povećane čvrstoće dijele se na: sitnozrnate normalizirane (feritno – perlitna struktura), poboljšane (mikrostruktura popuštenog martenzita) i termomehanički obrađene čelike.

Najnovija metalurška TMCP tehnologija (Thermo-mechanical controlled processing) omogućava da se pravilnim izborom kemijskog sastava i precizno kontroliranim procesom stupnja deformacije, temperature valjanja i brzine hlađenja čelika postiže takva mikrostruktura koja osigurava poželjna svojstva kao što su dobra zavarljivost, uz istodobno visoku duktilnost i žilavost. Zahvaljujući TMC procesu (valjanje ispod temperature rekristalizacije s naknadnim ubrzanim hlađenjem) te brižljivo izabranom kemijskom sastavu s malim dodacima mikrolegirajućeg elementa (manjim od 0,06%) za dodatno usitnjenje zrna, postiže se vrlo fina, sitnozrnata struktura, kao ključna značajka takvih čelika. Veličine zrna koje se postižu TMCP tehnologijom iznose 5-10 μm , a rezultat je značajno viša čvrstoća nego što bi bila kod

konvencionalnih zavarljivih čelika s jednako niskim sadržajem ugljika (manje od 0.09 %), te viša žilavost od onih koje se postižu kod normaliziranih čelika.

Pri zavarivanju visokočvrstih čelika osnovni problem predstavlja mogućnost pojave pukotina i velikih zaostalih naprezanja. Pukotine se mogu pojaviti u metalu zavara, u zoni utjecaja topline ili u osnovnom materijalu.

Hladne pukotine danas predstavljaju jedan od najčešćih problema pri zavarivanju visokočvrstih čelika, a dominantni uvjeti za nastanak hladnih pukotina su osjetljiva mikro struktura, sadržaj vodika i stanje naprezanja. Pukotine mogu nastati u metalu zavara ili u osnovnom materijalu, u zoni utjecaja topline ili izvan nje. Često ove pukotine prelaze jedna u drugu [1,2,3].

2. ČELICI VISOKE ČVRSTOĆE

Pored postizanja visoke vlačne čvrstoće i granice razvlačenja visokočvrsti čelici moraju posjedovati i visoku žilavost, visoku dinamičku izdržljivost, otpornost na koroziju, čvrstoću pri povišenim i visokim temperaturama, potpunu prokaljivost (95% martenzita u jezgri), laku obradljivost odvajanjem čestica, te sposobnost zavarljivosti i toplinske obrade.

U pogledu mikro strukturnih zahtjeva nastoji se dobiti sitnozrnata homogena mikro struktura uz izbjegavanje lokalnih heterogenosti, kao što su makro segregacije, kristalne segregacije i uključci. Heterogenost u atomarnom i submikroskopskom području poželjna je zbog jednoličnog usporavanja gibanja dislokacija.

Postizanje visoke vlačne čvrstoće obično dovodi do snižavanja plastičnosti i otpornosti na krhki lom. Pouzdanost čelika u konstrukcijama karakterizira se konstrukcijskom čvrstoćom, tj. skupom mehaničkih svojstava koja ovise o radnim uvjetima. Glavni parametri konstrukcijske čvrstoće su vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, žilavost i prijelazna temperatura žilavosti, te pukotinska lomna žilavost (*KIC*) [4,5].

2.1. RAZVOJ ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE

U razvoju konstrukcijskih čelika uočljiv je trend kontinuiranog rasta njihovih mehaničkih svojstava. Tako je početkom 20. stoljeća dopušteno projektno opterećenje iznosilo svega 80 MPa, da bi počelo rasti prema 100 MPa, a kasnije i do 160 MPa. Tom porastu nije toliko pridonio porast čvrstoće čelika koliko smanjenja sigurnosnih ograničenja uslijed manjeg rasipanja mehaničkih vrijednosti kod proizvodnje čelika [6].

U prvoj etapi razvoja (do godine 1947.) ti su se čelici razvijali iz općih konstrukcijskih čelika. Prvi korak u nastojanju izjednačavanja mehaničkih svojstava, pa tako i zavarljivosti, bio je postupak smirivanja čelika dodavanjem silicija (0,15 – 0,35 %), čime je postignuta bolja zavarljivost takvih čelika. Uskoro se pokazala potreba za povišenjem naprezanja tečenja i vlačne čvrstoće što je dovelo do postepenog povišenja postotka ugljika u čeliku na približno 0,4 % C. Porast čvrstoće ovih čelika bio je prvenstveno posljedica povišenja udjela perlita. Daljnje povećanje udjela ugljika više nije bilo moguće jer se uvidjelo da čelici sa više od 0,4 % C nemaju žilavi, već krhki karakter loma. O zavarljivosti se tada još nije vodilo računa jer su se konstrukcije izvodile tehnikama zakivanja ili spajanja vijcima. Slijedeći mehanizam kojim bi se dodatno povećala čvrstoća čelika bio je postupak legiranja čelika. Radi uvida u djelotvornost dodavanja pojedinih legiranih elemenata navode se iskustvene vrijednosti, prema Strassburgeru. Tehnički čisto željezo tako ima prema Strassburgeru vrijednosti:

$$R_m = 230 \text{ N/mm}^2 \text{ i}$$

$$R_e = 124 \text{ N/mm}^2,$$

a svakih 0,1 % legiranih elemenata povisuje te vrijednosti na način prikazan u tablici 1.

Tablica 1: Utjecaj legirnih elemenata na mehanička svojstva čelika [7]

Vrsta leg. elementa	Povišenje dodatkom 0,1 % leg. elementa	
	ΔR_m , N/mm ²	$\Delta R_{p0,2}$, N/mm ²
C	70	28
Si	9,2	5,6
Mn	8,0	8,4
Cr	7,4	5,5
Ni	3,4	5,5
Cu	5,7	8,0
P	46	55
Mo	25	20

U prvoj etapi razvoja postigla se granica tečenja:

$$R_e \leq 360 \text{ MPa i}$$

$$R_m \leq 600 \text{ MPa.}$$

Može se zaključiti da je povišenje naprezanja tečenja i čvrstoće čelika u prvoj fazi rezultat djelovanja legiranja, usitnjenja zrna i povišenja udjela perlita.

U drugoj etapi razvoja (od 1947 do 1958 godine) prisutne su tri koncepcije kojima se postiže daljnje povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće uz dovoljno nisku prijelaznu temperaturu.

Prva je legiranje zbog sniženja temperature transformacije. Ako pretvorba austenita počne na nižoj temperaturi, zrno produkta transformacije biti će sitnije. Loša strana ove grupe čelika bila je u tome što su oni povišenjem udjela legirnih elemenata postali polukaljivi, pa su se u zonama zavarivanja pojavljivale miješane strukture (martenzit, bainit, perlit), tako da je poslije normalizacije ili poslije zavarivanja bilo potrebno provesti popuštanje. Zbog toga su čelici te skupine postali preskupi za opću primjenu, ali su poslužili za razvoj današnjih niskolegiranih čelika za rad pri povišenim temperaturama.

Druga je koncepcija bila legiranje zbog postignuća bainita hlađenjem na zraku, pri čemu je dolazilo do usporavanja feritne preobrazbe. Otkrilo se da takve učinke daje samo legiranje sa borom. Daljnje se poboljšanje svojstava postiglo legiranjem sa kromom, čime se dodatno snizila temperatura bainitne transformacije.

Treći je pristup poboljšavanje čelika koje se provodi isključivo u čeličanama.

Od tih se čelika traži niski postotak ugljika ($\leq 0,2 \text{ \% C}$) radi bolje zavarljivosti, čime se oni razlikuju od klasičnih čelika za poboljšavanje i sličniji su po sastavu čelicima za cementiranje. Traži se takva kombinacija legiranih elemenata koja će omogućiti prokaljivanje u jezgri barem na 80 % martenzita i povisiti otpornost martenzita na popuštanje. Na taj način se postiže visoka žilavost uz istodobno zadržavanje što više čvrstoće i granice razvlačenja. Na kraju druge etape postignuta je granica razvlačenja:

$$R_e \leq 690 \text{ MPa},$$

$$R_m \leq 930 \text{ MPa i}$$

$$A_{\min} = 18 \text{ \%}.$$

U trećoj etapi razvoja (od 1960 godine do danas) radi se o sitnozrnatim mikrolegiranim čelicima koji se isporučuju normaliziranom ($R_e = 500 \text{ MPa}$), poboljšanom ($R_e = 1000 \text{ MPa}$) ili termomehanički obrađenom stanju ($R_e = 400 - 800 \text{ MPa}$), ovisno o postupku termomehaničke obrade. Dodaje se aluminij u suvišku u odnosu na udio potreban za dezoksidaciju, tako da ga nakon kristalizacije u čeliku ostane oko 0,02 %. On na sebe veže dušik u vrlo stabilni Al – nitrid (AlN), a posljedice tog spajanja su povišenje granice razvlačenja, dobra žilavost, niska prijelazna temperatura, sitno zrno i otpornost na starenje [7].

Termomehanički valjani čelici (TMCP) koji se proizvode do granice razvlačenja od 960 MPa jeftiniji su od poboljšanih čelika i imaju bolju zavarljivost, ali nisu dostupni za velike debljine stijenke.

Razvoj martenzitnih, tzv. maraging čelika doveo je do vrijednosti granice razvlačenja od 2400 MPa, ali je zbog visoke cijene materijala i proizvodnje primjena ograničena na zrakoplovnu i vojnu industriju [6].

2.2. ČELICI POVIŠENE I VISOKE ČVRSTOĆE

Cilj razvoja ovih čelika je postignuće više granice razvlačenja i više vlačne čvrstoće, a time i višeg dopuštenog naprezanja u eksploataciji. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuje se masa i volumen konstrukcije, što dovodi do sniženja ukupnih troškova materijala. U razvoju čelika povišene čvrstoće nastojao se zadržati povoljan omjer R_e / R_m (0,70 – 0,85), tzv. „plastična rezerva“, tako da u slučaju preopterećenja prvo dolazi do plastične deformacije a ne do iznenadnog loma. Zadržavanjem što nižeg % C, kao i nižim udjelima legiranih elemenata i zavarljivost ostaje zadovoljavajuća. Čelike povišene ili visoke čvrstoće treba primjenjivati uzimajući u obzir slijedeće činjenice:

1. Kod nekih tlačno opterećenih konstrukcija manjih presjeka može se pojaviti povećano izvijanje uz veliki progib, što ukazuje na problem krutosti. Zbog toga ovi čelici nisu pogodni za dugačke mostne konstrukcije, dizalice, dugačke brodove i sl.
2. Korozija dodatno smanjuje debljinu stjenke, pa se vremenom smanjuje nosivost presjeka, o čemu treba voditi računa pri dimenzioniranju presjeka.
3. Ovi čelici su osjetljiviji na zarezno djelovanje, pa je potreban oprez kod primjene u uvjetima promjenjivog dinamičkog opterećenja.
4. Porastom granice razvlačenja opada deformabilnost, a raste i osjetljivost prema pojavi krhkog loma.

2.2.1. Mehanizmi očvršnuća

Osnovni mehanizmi očvršnuća – povišenja granice razvlačenja kod ove grupe čelika su slijedeći:

1. Očvršnuće kristalima mješancima
Zapreke su otopljeni strani atomi u rešetki željeza čineći intersticijske ili supstitucijske kristale mješance. Od svih načina očvršnuća ovaj daje najmanje efekte.
2. Očvršnuće martenzitnom transformacijom
Kaljenjem dolazi do preklopne pretvorbe austenita u martenzit čime se povisuje tvrdoća i čvrstoća, ali pada istežljivost i žilavost, pa je nužno provesti dodatno popuštanje.
3. Očvršnuće hladnom deformacijom
Što je viši stupanj deformacije to će biti viša granica razvlačenja uslijed povećanja gustoće dislokacija. Pri tome znatno opada žilavost čelika.
4. Očvršnuće usitnjenjem zrna
Zapreke gibanju dislokacija čine velikokutne granice zrna, pa je povoljnije što sitnije zrno. Usitnjenjem zrna dolazi i do povišenja žilavosti

5. Očvršnuće izlučivanjem (precipitacijom) i disperzijom faza

Radi se o izdvojenim fazama nelegiranih ili legiranih karbida ili ostalih prikladnih intermetalnih spojeva i prijelaznih faza iz homogene mikro strukture ferita, austenita ili martenzita. Ove faze nastaju kad se prekorači granica topljivosti stranih atoma u rešetki željeza [4].

2.2.2. Podjela čelika povišene i visoke čvrstoće

Čelici povišene i visoke čvrstoće dijele se u sljedeće skupine:

1. Sitnozrnati normalizirani s feritno – perlitnom mikro strukturom, $360 \leq R_{p0,2} \leq 500$ MPa

Radi se o čelicima smirenim aluminijem i silicijem koji imaju sitniju feritno – perlitnu mikro strukturu i dobru zavarljivost. Nisu osjetljivi na krhki lom i imaju nisku prijelaznu temperaturu. Dobra zavarljivost osigurana je niskim masenim udjelom ugljika ($< 0,2 \% C$, $C_e < 0,4$). Unos topline pri zavarivanju treba tako regulirati da se u zoni utjecaja topline ostvari intenzitet hlađenja kao kod normalizacije.

Primjena normaliziranih sitnozrnatih čelika:

- kuglasti i valjkasti spremnici za propan, propilen, gradski plin,
- rezervoari za transport tekućih plinova,
- potpornji „off shore“ platformi za eksploataciju nafte i plina,
- mostovi, hangari i vijadukti,
- postolja vagona i vozila,
- dijelovi građevinskih strojeva.

2. Poboljšani sitnozrnati s mikrostrukturom popuštenog martenzita, $R_{p0,2} > 500$ MPa

Zbog potrebne dobre zavarljivosti svi čelici iz ove skupine sadrže manje od $0,2 \% C$. Niskougljični martenzit je najpogodnija mikro struktura za postizanje izvanrednih svojstava čvrstoće i žilavosti uz povišenu neosjetljivost na krhki lom. Zbog metalurških posebnosti ovi čelici zahtijevaju brižljivo provođenje postupka zavarivanja: izbor odgovarajućeg dodatnog materijala, te predgrijavanje i ograničeno dovođenje topline.

Tipični primjeri primjene ovih čelika su:

- kuglasti spremnici za plinove,
- mostovi,
- dijelovi buldožera i istovarivača,
- dijelovi dizalica,
- šasijske vozila, korita kamiona, vagoni za teški transport,
- kućišta i rotor vodnih turbina,
- dijelovi brodova kao što su jarboli, štitnici pramaca,
- cjevovodi [4].

2.3. VISOKOČVRSTI ČELICI

Kombinacijom različitih načina očvršnuća: usitnjenjem zrna, martenzitnom transformacijom, precipitacijom povezanom s deformacijom austenita, mogu se postići najviše vrijednosti granice razvlačenja ($R_{p0,2} > 1000$ MPa) i čvrstoće od svih polikristaličnih materijala.

Razvoj ultračvrstih čelika obuhvaća i nastojanje istovremenog postignuća i drugih važnih svojstava u primjeni kao što su:

- dovoljna duktilnost, otpornost na krhki lom, niska prijelazna temperatura i lomna žilavost,
- zadovoljavajuća otpornost na umor i niska zarezna osjetljivost,
- dobra korozijska postojanost,
- čvrstoća pri povišenim i visokim radnim temperaturama,
- laka obradljivost odvajanjem čestica,
- zadovoljavajuća zavarljivost [4].

2.3.1. Podjela visokočvrstih čelika

Visokočvrsti čelici mogu se podijeliti u slijedeće skupine:

- niskolegirani niskopopušteni čelici,
- visokolegirani Cr-Mo-V visokopopušteni čelici,
- termomehanički obrađeni čelici,
- korozijski postojani precipitacijski očvršnuti čelici,
- hladnom deformacijom očvršnuti nelegirani i niskolegirani čelici,
- „maraging“ čelici.

1) Niskolegirani niskopopušteni čelici

Čelici iz ove skupine legirani su silicijem ili niklom, te kombinacijama Cr-Mo-V. Povoljna mehanička svojstva mogu se postići i izotermičkim poboljšavanjem pri 250 – 350 °C na bainitnu mikrostrukturu. Visoka čvrstoća čelika potrebna je zbog postizanja dovoljne lomne žilavosti i dinamičke izdržljivosti. Postizive vrijednosti granice razvlačenja i čvrstoće iznose i do 2000 MPa.

2) Visokolegirani Cr-Mo-V visokopopušteni čelici

Po sastavu i načinu provedbe toplinske obrade (kaljenje i visokotemperaturno popuštanje) poznati su kao alatni čelici za topli rad.

Popuštanjem pri 500 – 550 °C dolazi do raspada zaostalog austenita i izlučivanja karbida popuštanja što dovodi do pojave povišenja tvrdoće u odnosu na tvrdoću kaljenja, tzv. sekundarna tvrdoća. Postizive vrijednosti vlačne čvrstoće su i do 2000 MPa, dok dinamička izdržljivost ostaje u omjeru $R_d \approx 0,5 R_m$.

3) Termomehanički obrađeni čelici

Kombinacijom postupaka oblikovanja deformiranjem i toplinskih obrada kaljenja i izotermičkog poboljšavanja postojećih sastava čelika moguće je dobiti istovremeno visoku granicu razvlačenja i čvrstoću uz relativno dobru plastičnost i sigurnost od krhkog loma. Deformiranje se odvija prije ili u toku transformacije mikro strukture (termomehanička obrada), ili nakon faznih pretvorbi (mehanotermička obrada). Termomehaničkom obradom kaljivih čelika dolazi do očvršnuća i to zbog:

- povećanja gustoće dislokacija pri oblikovanju austenita i pri njegovoj transformaciji u martenzit,
- promjene sastava i morfologije martenzita,
- stvaranja razgranate mreže granica podzrna u toplo deformiranom austenitu,
- izlučivanja sitnih, jednoliko raspoređenih karbida tijekom popuštanja.

Postizive vrijednosti mehaničkih svojstava ovim postupcima iznose $R_{p0,2} < 2600$ MPa, $R_m < 3000$ MPa, $A_5 < 20$ %.

4) Korozijski postojani precipitacijski očvršnuti čelici (PH – čelici)

Razvojem korozijski postojanih precipitacijski očvršnutih čelika željelo se ostvariti visoku granicu razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozijske postojanosti. Uz nužno potreban što niži maseni udio ugljika i visok stupanj legiranosti, visoko očvršnuće se postiže preko precipitacije intermetalnih spojeva.

S obzirom na mikro strukture prije precipitacije razlikuju se:

- martenzitni PH – čelici ($R_{p0,2} < 1350$ MPa),
- poluaustenitni PH – čelici ($R_{p0,2} < 1800$ MPa),
- austenitni PH – čelici ($R_{p0,2} < 900$ MPa).

5) Hladnom deformacijom očvršnuti nelegirani i niskolegirani čelici

Hladnom deformacijom povišu se čvrstoća i granica razvlačenja uslijed povećanja gustoće dislokacija, ali ovaj mehanizam očvršnuća snižava duktilnost i poviše prijelaznu temperaturu. U praksi se na taj način očvršćuju tanke žice za transportnu užad i užad žičara, žice za opruge, tanki limovi i trake, betonski čelik i sl.

Ultravisoka čvrstoća ($1600 > R_m > 3000$ MPa) postiže se patentiranjem hladnovučene žice eutektoidnog čelika.

6) „Maraging“ čelici

Naziv maraging dolazi iz engleskog jezika, a može se prevesti kao „dozrijevanje martenzita. Radi se o visokolegiranim čelicima s malim masenim udjelom ugljika ($< 0,03$

% C). Dozrijevanjem u nikl – martenzitu precipitira niz fino dispergiranih intermetalnih spojeva čiji sastav ovisi o sastavu čelika. Ove faze visoke tvrdoće sprječavaju gibanje dislokacija i tako povisuju granicu razvlačenja ($R_{p0,2} > 2200$ MPa) i vlačnu čvrstoću ($1900 > R_m > 2900$ MPa) uz vrlo povoljnu vrijednost lomne žilavosti u odnosu prema drugim čelicima. Osim visoke granice razvlačenja, čvrstoće i lomne žilavosti čelici maraging imaju bolja tehnološka svojstva u odnosu na ostale ultračvrste čelika, kao što su:

- male deformacije pri toplinskoj obradi, a bez opasnosti od razugljičenja i oksidacije,
- laka obradljivost odvajanjem čestica i hladna deformabilnost nakon rastvornog žarenja,
- dobra zavarljivost uslijed niskih udjela C, P i S.

Maraging čelici nalaze konstrukcijsku primjenu u mehanički visokoopterećenim dijelovima zrakoplova, helikoptera i trkaćih automobila, kao i alatnu primjenu za kokile i ukovnje zamjenjujući čelike za topli rad.

Zbog težnje visokoj čistoći čelika i malim udjelima neželjenih primjesa i uključaka proizvodnja visokočvrstih čelika vrlo je skupa pa je njihova primjena opravdana samo za dijelove visoko opterećenih i pouzdanih konstrukcija, kao što su: dijelovi vozila, zrakoplova, raketa i svemirskih letjelica, dijelovi oružja i dr. [4,5].

3. ZAVARLJIVOST ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE

3.1. POJAM ZAVARLJIVOSTI

Pojam zavarljivosti je vrlo složen problem, te se teško jednoznačno određuje. Međunarodnim i nacionalnim standardima pokušalo se definirati zavarljivost, ali dobivene su vrlo općenite definicije koje ne govore o potrebnim svojstvima materijala. Tako je ISO standardom zavarljivost definirana na slijedeći način: „Metalni materijal se smatra zavarljivim određivanjem stupnja zavarljivosti, danim postupkom zavarivanja i za danu namjenu, ako se može postići homogenost spoja pri primjeni pogodnog postupka zavarivanja, tako da spojevi odgovaraju zahtjevima njihovih lokalnih svojstava i njihovog utjecaja na konstrukciju, čiji su oni sastavni dio“. Radi shvaćanja teškoća pri određivanju zavarljivosti dana su objašnjenja pojedinih pojmova vezanih uz utjecajne čimbenike [8].

1) Podobnost za zavarivanje ovisi o svojstvima materijala, na što utječu:

- kemijski sastav,
- metalurška svojstva,
- fizikalna svojstva.

2) Sigurnost zavarenog spoja, na što utječu:

- konstrukcijski oblik,
- vrsta i veličina naprezanja,
- debljina stjenki elementa,
- pogonska temperatura,
- medij.

3) Mogućnost zavarivanja predviđenim postupkom, na što utječu:

- priprema za zavarivanje,
- izvođenje zavarivanja,
- naknadna obrada.

3.2. ISPITIVANJE ZAVARLJIVOSTI

Za ocjenu zavarljivosti visokočvrstih čelika provode se brojna ispitivanja, kao što su:

- nastajanje hladnih pukotina,
- nastajanje toplih pukotina,
- lamelarno trganje,

- krhki lom,
- povišenje tvrdoće materijala,
- starenje materijala,
- nastajanje pukotina u visokočvrstom materijalu.

Za eksploataciju su općenito važna slijedeća svojstva

- što viši udarni rad loma KV ,
- što niža prijelazna temperatura T_{pr} ,
- visoka dinamička izdržljivost R_d i niska zarezna osjetljivost,
- sposobnost da jednom nastala pukotina bude zaustavljena u materijalu K_{IC} ,
- visoka otpornost na trošenje,
- visoka otpornost na koroziju [2].

3.2.1. Pukotine u zavaru

Opći uzroci nastajanja pukotina u metalu zavaru su loš izbor osnovnog ili dodatnog materijala, loše izvođenje zavarivačkih radova i sl.

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u metalu zavaru su:

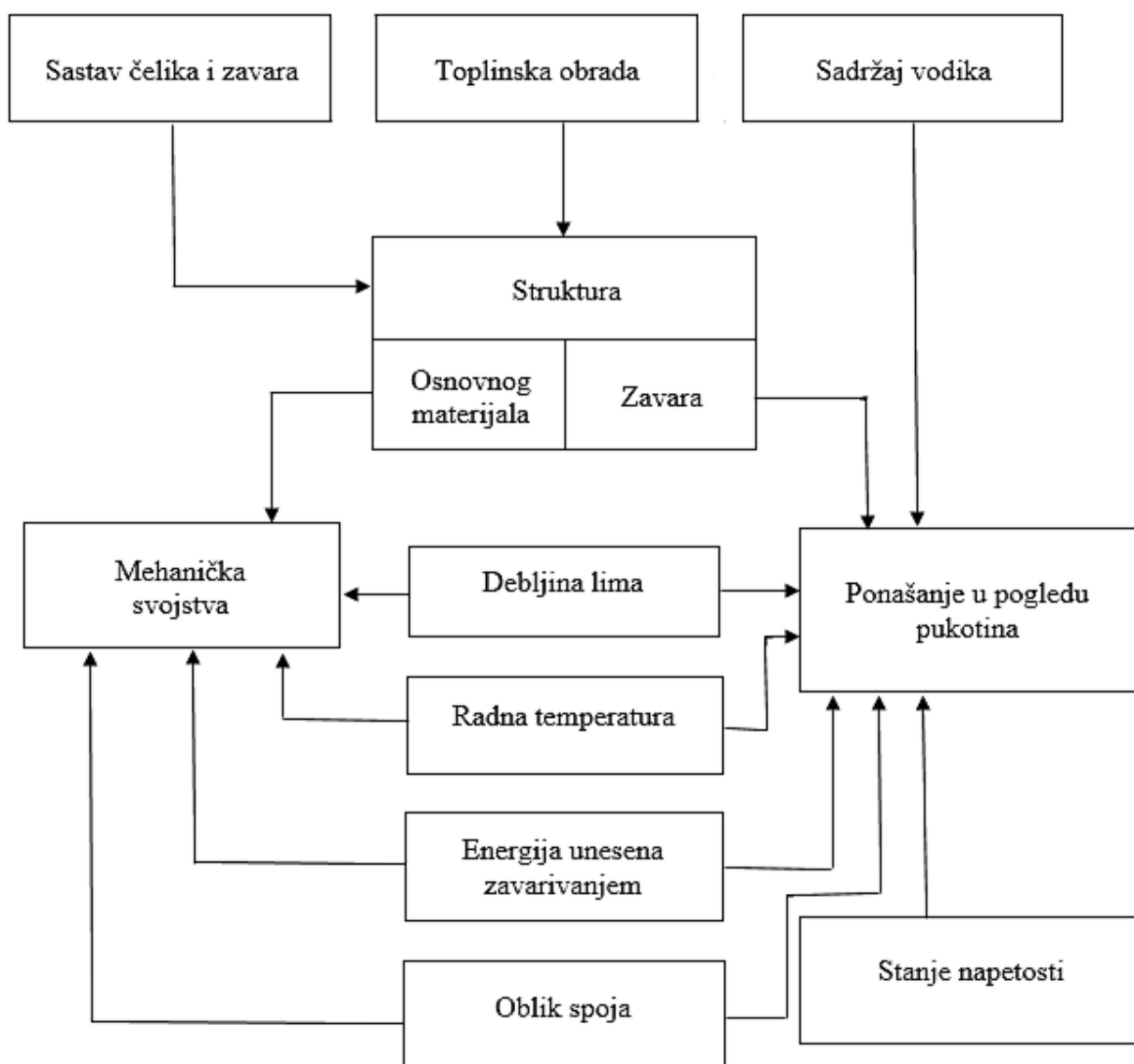
- prevelika brzina hlađenja zavarenog spoja,
- strukturne transformacije u zavarenom spoju odnosno nastajanje krhkih struktura.

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u osnovnom materijalu su:

- kemijski sastav materijala,
- prisutnost vodika,
- nastajanje unutrašnjih naprezanja zbog temperaturnog ciklusa pri zavarivanju.

Osim općih uzroka na nastajanje pukotina utječu i greške u materijalu, prisutnost zaostalih naprezanja nakon valjanja ili oblikovanja i sl [2,8].

Shematski prikaz utjecajnih činitelja na mehanička svojstva i ponašanje u pogledu pukotina dan je na slici 1.



Slika 1: Shematski prikaz utjecajnih činitelja u zavarenom spoju [8]

3.2.2. Mjere za smanjivanje opasnosti od pukotina u zavaru

Skлонost nastajanju pukotina može se smanjiti slijedećim postupcima:

- upotrebom dodatnog materijala s niskim sadržajem vodika koji u zavarenom spoju izaziva krhkost,
- upotrebom austenitnog dodatnog materijala zbog veće rastvorivosti vodika u austenitu i zbog veće istezljivosti materijala s austenitnom strukturom,
- predgrijavanjem, koje u slučaju visokočvrstih čelika treba uzeti kao parametar koji povećava ili smanjuje unešenu energiju, kako bi se vrijeme hlađenja zadržalo u preporučenim granicama,
- pravilnim izborom postupaka i uvjeta zavarivanja,

- vodeći računa o čistoći u pripremi spoja za zavarivanje, ne smije biti vlage, hrđe, okujine i masnoća, a površinu uz sam zavar treba obrisati,
- ograničavajući unos topline tijekom zavarivanja,
- provođenjem višeslojnog zavarivanja vezanim slojevima, bez velikog poprečnog gibanja vrha elektrode,
- izvođenjem redoslijeda zavarivanja koji osigurava najmanja zaostala naprezanja u zavarenom spoju [10].

3.3. TEMPERATURA PREDGRIJAVANJA

Visokočvrsti čelici pored visoke granice razvlačenja i čvrstoće posjeduju i dobru udarnu žilavost. Izraženiji pad žilavosti može se očekivati u ZUT-u zbog pogrubljenja zrna uslijed brzog hlađenja. Da bi se to izbjeglo unos topline mora biti optimalan, pa se propisuje odgovarajuća temperatura predgrijavanja T_0 . Unos topline mora se strogo kontrolirati kako bi vrijeme hlađenja sa 800 do 500 °C ($t_{8/5}$) iznosilo 13 – 8 sekundi.

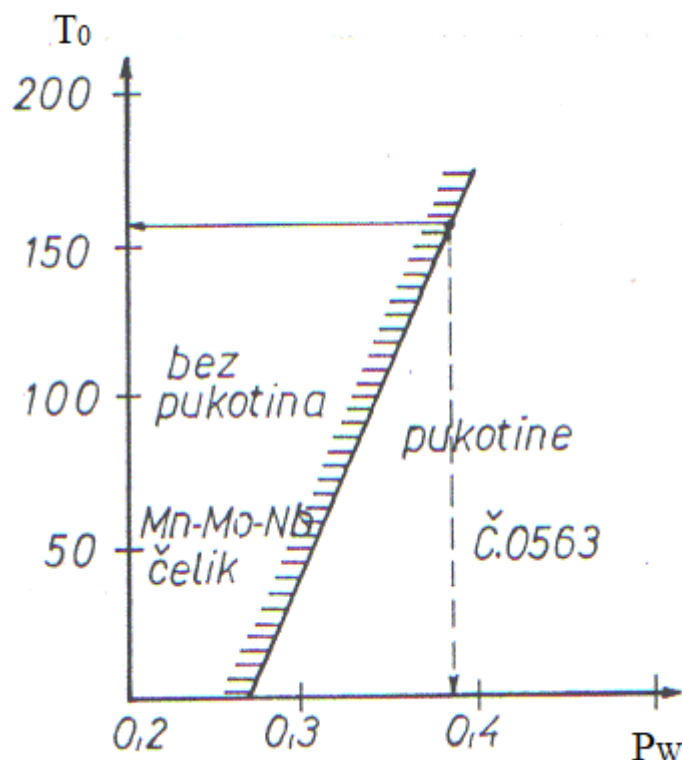
Temperatura predgrijavanja visokočvrstih čelika izračunava se prema Ito – Bessyo formuli koja uzima u obzir kemijski sastav (putem čimbenika P_{CM} koji predstavlja ekvivalent ugljika), debljinu osnovnog materijala (d), parametar pukotine (P_W) i sadržaj difuzijskog vodika (H) [11].

$$T_0 = 1440 \cdot P_W - 392 \quad (1)$$

$$P_W = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{d}{600} \quad (2)$$

$$P_{CM} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{V}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Si}{30} + 5 \cdot B \quad (3)$$

Zavisnost pukotinskog parametra (P_W) o temperaturi predgrijavanja (T_0) može se prikazati odgovarajućim dijagramom na slici 2.



Slika 2: Zavisnost parametra pukotina o temperaturi predgrijavanja [8]

Ukoliko vrijednost parametra pucanja P_w dobivena po formuli Ito – Bessyo kod visokočvrstih čelika premašuje iznos $P_w > 0,24$ zaključuje se da je čelik sklon hladnim pukotinama kod zavarivanja. Zbog toga je potrebno odrediti minimalno potrebnu temperaturu predgrijavanja i temperaturu između pojedinih prolaza, kako bi se kontroliranim unosom topline (primarnim kroz predgrijavanje i sekundarnim kroz efektivni toplinski input u električnom luku) ostvarili povoljni uvjeti hlađenja i kako bi se izbjegla hladne pukotine u zavarenom spoju. Temperatura između prolaza je ustvari temperatura predgrijavanja svakog slijedećeg prolaza nakon izvođenja prvog prolaza. Ako je potrebno dogrijavati materijal između prolaza, onda se temperatura između prolaza veže uz minimalno potrebnu temperaturu predgrijavanja. Mjerenje temperature predgrijavanja je obavezno, a vrši se najčešće kontaktnim termometrom ili termokredama. Ako se mjeri termokredama, preporučuje se mjerenje sa tri termokrede: odgovarajućom, prva niže i prva više vrijednosti. Temperatura predgrijavanja kontrolira se i sa suprotne strane mjesta zagrijavanja. Time se provjerava predgrijavanje po cijelom presjeku materijala koji se zavaruje. Presporo predgrijavanje je neekonomično, a prebrzo može prouzročiti deformacije i lomove pripoja. Na materijalima koji zahtijevaju predgrijavanje prije zavarivanja, kontrola temperature predgrijavanja mora se provoditi i prije izvođenja zavarivačkih pripoja. Za vrijeme zavarivanja kontrolira se temperatura između prolaza koja ne smije odstupati od zahtjevana u WPS-u. Ako treba, provodi se dogrijavanje ili se čeka ohlađivanje do tzv. temperature između prolaza ili međuslojne temperature.

Predgrijavanje se može provoditi plamenicima, odnosno plinskim plamenom, elektrootporno ili indukcijski. Ako se izvodi plinskim plamenom preporučuju se plinovi propan-butan ili zemni plin uz stlačeni zrak. Ne preporučuje se predgrijavanje acetilenom i kisikom zbog neekonomičnosti [12].

3.3.1. Funkcije predgrijavanja

Prva funkcija predgrijavanja je sušenje površine obratka. Površinska vlaga u obliku vode, snijega, leda ili mraza u električnom luku se razlaže na vodik i kisik. Ugljikovodici poput ulja, maziva i sl. također pridonose povećanju vodika u električnom luku. Vodik se rastvara u rastaljenom metalu što dovodi do niza negativnih posljedica, od pojave pora do vodikom uzrokovanih hladnih pukotina.

Druga funkcija predgrijavanja je smanjivanje brzine hlađenja kod čelika kod kojih postoji pretvorba iz austenita u ferit, bainit ili martenzit. Manja brzina hlađenja rezultira mikro strukturom niže tvrdoće koja je manje osjetljiva na pukotine.

Treća funkcija predgrijavanja je podizanje temperature zavara iznad prijelazne temperature žilavog u krhki lom. Time se sprječava nastanak pukotina zbog grešaka vezivanja i lošeg protaljivanja kao i zbog postojećih pukotina. Martenzitni čelici mogu imati prijelaznu temperaturu iznad sobne temperature, mnogo višu od većine konstrukcijskih čelika.

Četvrta funkcija predgrijavanja je smanjivanje zaostalih naprezanja koja nastaju uslijed procesa zavarivanja. Zaostala naprezanja nastaju uslijed toplinske kontrakcije i stezanja metala zavara i ZUT-a prilikom hlađenja. Hladniji osnovni materijal sprječava ovu kontrakciju, a rezultat je zaostalo vlačno naprezanje u metalu zavara kao i u ZUT-u. Zaostala naprezanja bit će veća proporcionalno veličini temperaturne razlike između osnovnog materijala i skrutnjavajućeg metala zavara, a predgrijavanjem se ta temperaturna razlika smanjuje.

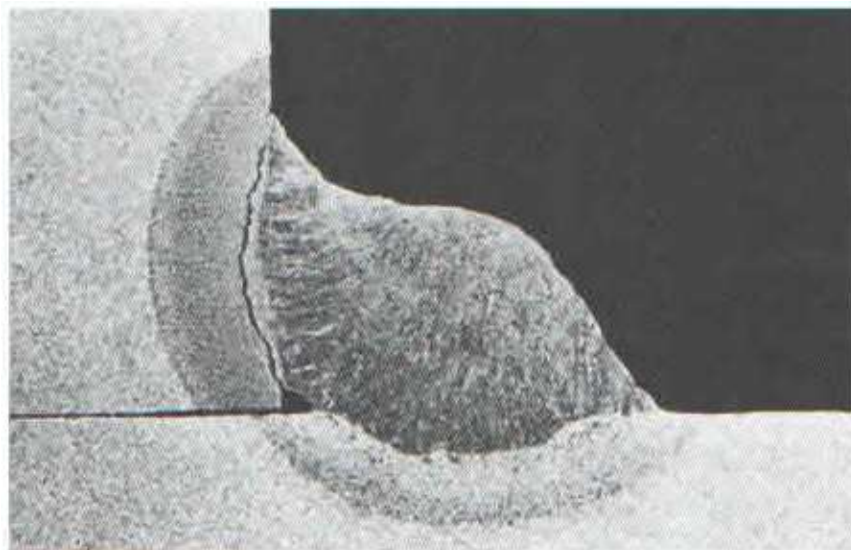
Čelici visoke čvrstoće obično su skloni nastajanju hladnih pukotina kod zavarivanja. Međutim, nisu isključene i tople pukotine kod prevelikog unosa topline, velikih količina taline zavara ili nepovoljnog oblika zavara [10].

3.4. HLADNE PUKOTINE

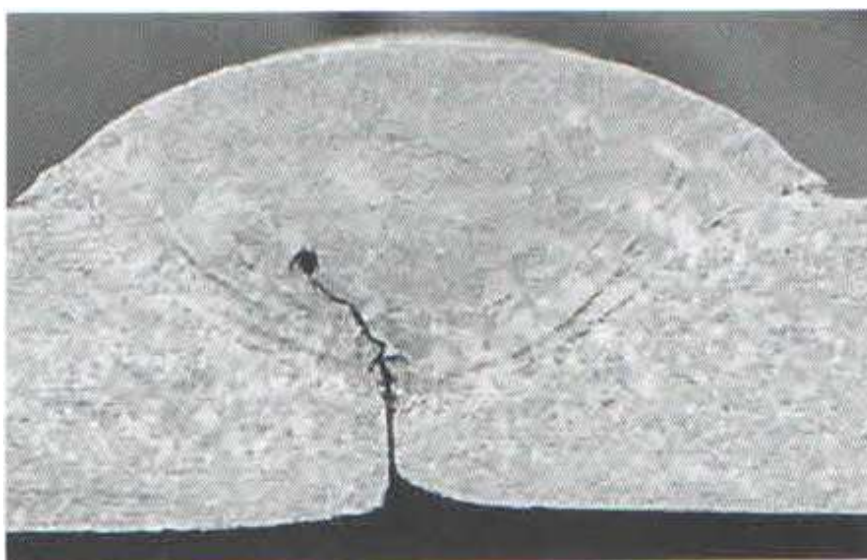
Pri zavarivanju visokočvrstih čelika na prvom mjestu javlja se problem pojave pukotina. Pukotine mogu nastati u metalu zavara, u zoni utjecaja topline ili u osnovnom materijalu.

Hladne su pukotine najčešći i najopasniji tip greške prilikom zavarivanja visokočvrstih čelika. Nastaju nakon izvršenog zavarivanja na temperaturi nižoj od 300 °C. Mogu se pojaviti i više sati nakon završetka zavarivanja, pa je u praksi uobičajeno čekanje od najčešće 24 – 48 sati prije provedbe nerazornih ispitivanja. Pojavljuju se uglavnom kod zavarivanja čelika povišene i visoke čvrstoće, posebno kod većih debljina. Mogu biti položene uzdužno i poprečno u odnosu na zavar ili na prijelazu u osnovni materijal. Također, mogu biti površinske, vidljive,

ali i nevidljive, u dubini zavarenog spoja. Prema veličini razlikujemo mikropukotine, nevidljive golim okom, ali i mnogim od nerazornih metoda ispitivanja, pa sve do makropukotina koje se lakše uočavaju. Na slikama 3 i 4 mogu se vidjeti neke od karakterističnih hladnih pukotina u području zavarenog spoja.



Slika 3: Hladna pukotina u ZUT-u kutnog spoja [10]



Slika 4: Hladna pukotina iz neprovarenog korijena zavara sučeljenog spoja [10]

Glavni uzročnici nastajanja hladnih pukotina su:

- mikro strukture metala zavara i ZUT-a osjetljive na djelovanje vodika,
- prisutnost vodika u zavaru,
- djelovanje naprezanja nastalih skupljanjem zavara,
- nepovoljan položaj uključaka u zavaru.

Mehanizam nastajanja hladnih pukotina vrlo je složen i vjerojatno dolazi do interakcije više različitih mehanizama, ovisno o koncentraciji vodika, mikro strukturi, postojanju diskontinuiteta i nepravilnosti, naprezanjima, temperaturi i vremenu. Tvrdi zakaljiva struktura čelika ima smanjenu istezljivost pa pod utjecajem velikih zaostalih naprezanja može doći do loma, odnosno do pojave pukotina.

Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama definirane su u nizu normi HRN EN ISO 17642-1;2008 Ispitivanja zavara razornim metodama na metalnim materijalima. Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva hladnim pukotinama. Elektrolučni postupci zavarivanja [13].

Metode ispitivanja sklonosti zavarenih spojeva hladnim pukotinama su:

- Tekken metoda,
- implant test,
- CTS

U pogledu prevencije nastanka hladnih pukotina moguće je poduzeti neke mjere. To su: izbjegavanje ukrućenosti zavarenog sklopa, izbor oblika spoja sa što manjom količinom unesenog dodatnog materijala, pravilan izbor postupka i parametara zavarivanja, pri čemu posebno važnu ulogu ima unos toplinske energije [3, 10].

3.5. UNOS TOPLINSKE ENERGIJE

Unos topline pri zavarivanju određuje niz čimbenika o kojima ovise mehanička svojstva, oblik i geometrija, te korozijska postojanost zavarenog spoja. Premali unos topline povećava sklonost hladnim pukotinama, a prevelik pogrubljenju zrna, smanjenju žilavosti, a ponekad i sklonosti toplim pukotinama. Unos topline navodi se u specifikaciji postupka zavarivanja i u kvalifikaciji postupka zavarivanja.

Često se u praksi javlja problem tumačenja vrijednosti unosa topline, načina izračuna, te nužnih parametara koje treba kvantificirati, kako bi se pomoću odgovarajućih formula mogao izračunati unos topline. Potrebno je naglasiti da osnovni parametri koje je nužno poznavati za izračun unosa topline (jakost struje (A), napon zavarivanja (V), brzina zavarivanja (cm/min)) moraju biti izmjereni i provjereni jer se vrlo često na izvorima struje u praksi susreću velike razlike u odnosu na očitano i stvarno stanje parametara. To vrlo često može rezultirati primjenom pogrešnih parametara i postizanjem kvalitete zavarenog spoja koja nije primjerena postavljenim zahtjevima.

Također, postoje razlike u izračunu unosa topline ako se primjenjuju EN i ASME norme, gdje se uz iste parametre zavarivanja dobivaju značajno različite vrijednosti.

3.5.1. Izračun unosa topline prema normi HRN EN 1011-1

Kod izračuna unosa topline mora se posebno obratiti pažnja na jedinicu brzine zavarivanja jer ako se ne unese vrijednost u SI sustavu mjernih jedinica (mm/s) dobiju se različite vrijednosti. U praksi to predstavlja problem jer se brzina zavarivanja najčešće izražava u (cm/min) ili (m/min), što znatno pomaže u percepciji brzine zavarivanja. Također, uobičajeno je da se unos topline izražava u (kJ/cm). Kad se računa s brzinom izraženom u (cm/min) i ako je rezultat potrebno izraziti u (kJ/cm), tada izraz za izračunavanje količine topline unesene u zavareni spoj ima slijedeći oblik:

$$Q = k \cdot \frac{V \cdot I}{v} \cdot \frac{60}{1000} \quad (4)$$

Gdje su:

Q – unesena toplina; kJ/cm

K – koeficijent iskoristivosti topline električnog luka postupka zavarivanja

U – napon zavarivanja; V

I – struja zavarivanja; A

v – brzina zavarivanja; cm/min

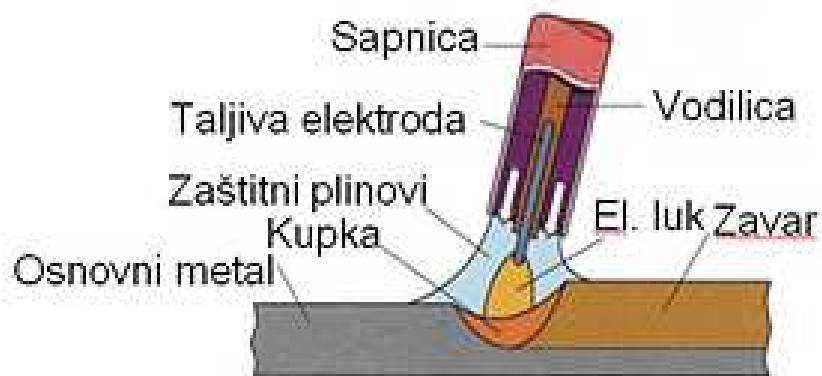
U tablici 2 mogu se vidjeti koeficijenti iskoristivosti topline električnog luka, ovisno o postupku zavarivanja [10, 14].

Tablica 2: Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka (k)
 ovisno o postupku zavarivanja prema HRN EN 1011-1 [10]

Oznaka postupka prema HRN EN ISO 4063	Postupak zavarivanja	Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka k
121	EPP	1,0
111	REL	0,8
131	MIG	0,8
135	MAG	0,8
114	Samozaštićujuća praškom punjena žica	0,8
136	Praškom punjena žica u plinskoj zaštiti	0,8
141	TIG	0,6
15	Plazma	0,6

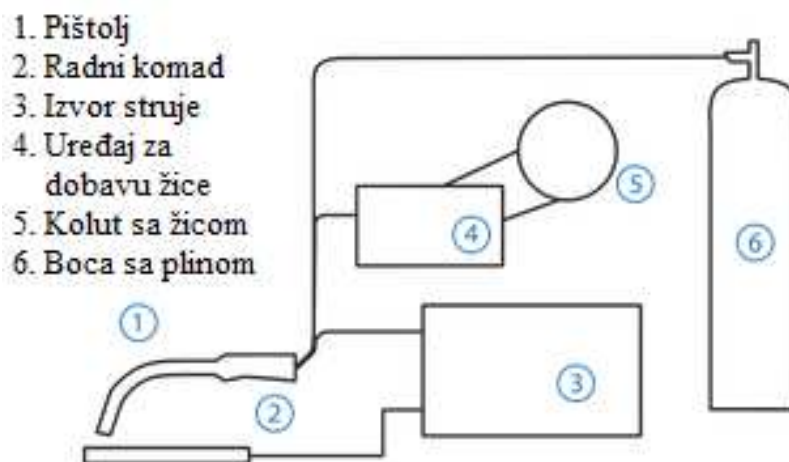
4. MAG ZAVARIVANJE

MAG (Metal Active Gas) je postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice, u pravilu spojene na plus pol istosmjernog izvora struje i radnog komada koji se zavaruje. Ionizacija električnog luka u čistim plinovima je slaba, pa se za stabilno održavanje luka ne može koristiti izmjenična struja. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi aktivnih plinova (CO_2 i mješavine), pa se ovaj postupak često naziva i CO_2 postupak. Shematski prikaz postupka može se vidjeti na slici 5.



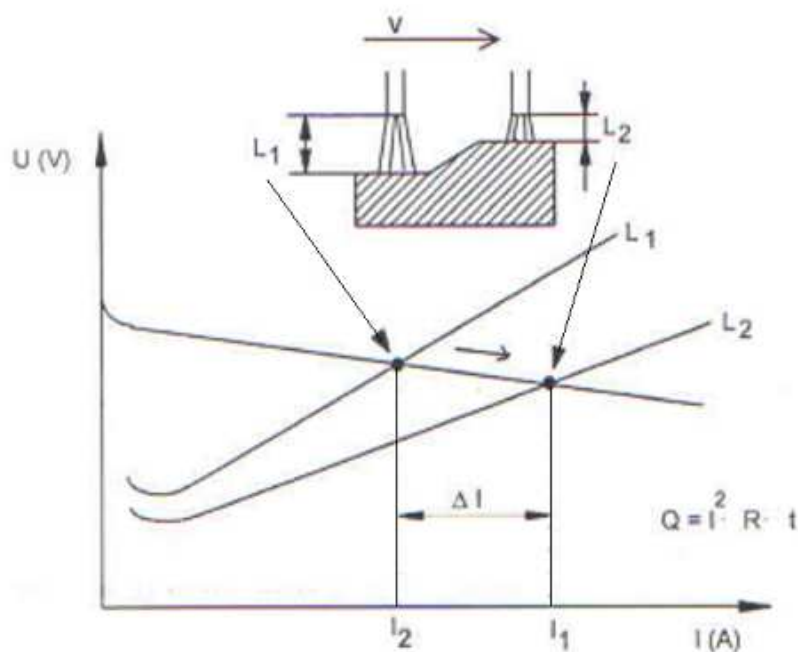
Slika 5: Shematski prikaz MAG zavarivanja [15]

Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Žica je istovremeno i elektroda i dodatni materijal, odnosno njenim taljenjem se popunjava pripremljeni žlijeb. Postupak može biti automatski (potpuno mehaniziran), poluautomatski (dodavanje žice u električni luk je mehanizirano, a držanje i vođenje pištolja je ručno) i robotizirano. U drugom slučaju glava s pištoljem može biti pokretana s nekim mehanizmom, ili je ona nepomična, ali zato radni komad ima mehanizirano gibanje. U industriji se najviše koristi poluautomatski MAG postupak zavarivanja jer je prilagodljiv svim uvjetima rada i ima veliku produktivnost. Shematski prikaz kompletnog uređaja može se vidjeti na slici 6.



Slika 6: Shematski prikaz kompletnog uređaja [17]

Kada se zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od 5 metara od izvora struje obično se primjenjuje dodatni pogon za dovođenje žice smješten u samom pištolju. Uobičajeni naziv za takav sistem je „push – pull“. Njegova primjena je nužna i na manjim udaljenostima kada se radi o tanjim žicama ili o žicama od mekših materijala. Zaštitni plinovi koji se koriste kod ovog postupka štite rastaljeni metal od štetnog utjecaja iz atmosfere, a dovode se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice. Ionizacijom plina osigurava se vodljivi prostor za održavanje električnog luka.



Slika 7: Unutarnja regulacija visine električnog luka

Izvori struje za MAG zavarivanje imaju ravnu ili blago padajuću statičku karakteristiku, te unutarnju (strujnu) regulaciju. Ova regulacija podrazumijeva da je izvor struje za zavarivanje napravljen tako da kod male promjene visine električnog luka dolazi do veće promjene jakosti struje. To, ovisno o karakteru promjene, dovodi do bržeg ili sporijeg taljenja žice za zavarivanje, te ponovnog uspostavljanja ravnotežnog stanja – željene visine električnog luka. Princip regulacije prikazan je na slici 7. Zbog promjene jakosti struje (AI) razvija se manja ili veća količina Joule - ove topline (Q) koja se troši na sporije ili brže taljenje dodatnog materijala, kako bi se čim prije došlo do željenog ravnotežnog stanja i stabilnosti glavnih parametara zavarivanja [11, 17].

4.1. Dodatni materijal za MAG zavarivanje

Kod MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Površina žice mora biti glatka, dimenzija vrlo točna i treba biti uredno namotana na kolute koji se postavljaju u uređaj za dodavanje. Kemijski sastav žice mora biti sličan osnovnom materijalu koji se zavaruje.

Osim punih žica koriste se i praškom punjene žice. Takve žice mogu imati raznovrsne presjeke, ovisno o načinu proizvodnje. Praškom punjene žice koriste se uz plinsku zaštitu, a postoje i žice koje same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre, pa se ne zahtijeva dodatna zaštita plinom.

Prema karakteristikama električnog luka razlikujemo četiri karakteristična načina prijenosa: kratkim, štrcajućim, mješovitim i impulsnim lukom. Prijenos metala kratkim spojevima vrši se uz male struje zavarivanja i mali napon električnog luka. Time se ostvaruje mala količina rastaljenog metala, pa je takav način zavarivanja pogodan za zavarivanje tankih limova, zavarivanje korijenskog sloja i zavarivanje u prisilnim položajima. Prijenos štrcajućim lukom ostvaruje se uz jake struje zavarivanja i veliki napon električnog luka.

Time se ostvaruje velika penetracija i veliki unos topline, što je pogodno za zavarivanje predmeta velike debljine, ali samo u položenom položaju [11, 17].

4.1.1. HRN EN ISO 16834 [18]

Ovaj međunarodni standard razlikuje dva različita pristupa u klasifikaciji dodatnog materijala kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće u struji zaštitnog plina i dopušta primjenu oba pristupa, ovisno o tržišnim zahtjevima. Standardom se definira klasifikacija žičanih elektroda, žica, šipki i depozita u pogledu njihovog kemijskog sastava, vlačne čvrstoće, granice razvlačenja, kao i istezljivosti.

Omjer granice razvlačenja i vlačne čvrstoće metala zavara u pravilu je veći u odnosu na osnovni materijal. Potrebno je imati na umu da podudaranje u vrijednosti granice razvlačenja metala zavara i osnovnog metala nužno ne rezultira takvim podudaranjem kad se radi o

vlačnoj čvrstoći. Ukoliko se zahtijeva jednaka vlačna čvrstoća metala zavara i osnovnog metala odabir dodatnog materijala vrši se prema stupcu 3 u tablici 1A ili 1B, ovisno o potrebi.

Klauzule, pod točke i tablice označene indeksom „A“ odnose se na žičane elektrode, žice, šipke i depozite klasificirane prema granici razvlačenja R_e i udarnom radu loma od 47 J, dok se oznakom „B“ označava klasifikaciju prema vlačnoj čvrstoći i udarnom radu loma od 27 J. Klauzule, pod točke i tablice koje nisu označene navedenim simbolima primjenjuju se na sve žičane elektrode, žice, šipke i depozite.

4.1.1.1. Klasifikacija prema granici razvlačenja R_e i udarnom radu loma od 47 J

Ova klasifikacija definira podjelu na slijedećih šest dijelova:

- 1) Prvi dio predstavlja oznaku kojom se identificira postupak zavarivanja. Obzirom na postupak zavarivanja razlikuju se dvije oznake: „G“ za MIG/MAG postupak zavarivanja i „W“ za TIG postupak zavarivanja.

Tablica 3: Klasifikacija dodatnog materijala prema granici razvlačenja i istezljivosti [18]

Oznaka	Minimalni iznos granice razvlačenja R_e , MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Minimalna istezljivost A , %
55	550	640-820	18
62	620	700-890	18
69	690	770-940	17
79	790	880-1080	16
89	890	940-1180	15

- 2) Drugi dio predstavlja oznaku koja predstavlja čvrstoću i istezljivost metala zavara, kao što je prikazano tablicom 3.
- 3) Treći dio predstavlja oznaku koja ukazuje na vrijednost udarnog rada loma metala zavara. Oznaka definira temperaturu pri kojoj je postignuta vrijednost udarnog rada loma od 47 J. Potrebno je provesti tri ispitivanja uzoraka pri čemu se jedna vrijednost smije nalaziti u intervalu 32-47 J, dok preostale dvije ne smiju biti manje od 47 J.
- 4) Četvrti dio predstavlja oznaku kojom se identificira upotrebljen zaštitni plin. Zaštitni plin označava se sukladno normi HRN EN ISO 14175:2008 – Dodatni i potrošni

materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke [19].

- 5) Peti dio predstavlja oznaku koja ukazuje na kemijski sastav žičane elektrode, žice ili šipke, te indikaciju karakterističnih legiranih elemenata.
- 6) Šesti dio predstavlja oznaku koja ukazuje na toplinsku obradu nakon postupka zavarivanja ukoliko ju je potrebno provesti, a označava se slovom T.

4.1.1.2. Klasifikacija prema vlačnoj čvrstoći R_m i udarnom radu loma od 27 J

Ova klasifikacija definira podjelu na slijedećih pet dijelova:

- 1) Prvi dio predstavlja oznaku kojom se identificira postupak zavarivanja. Obzirom na postupak zavarivanja razlikuju se dvije oznake: „G“ za MIG/MAG postupak zavarivanja i „W“ za TIG postupak zavarivanja.

Tablica 4: Klasifikacija dodatnog materijala prema granici razvlačenja i istezljivosti [18]

Oznaka	Minimalni iznos granice razvlačenja R_e , MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Minimalna istezljivost A, %
59X	490	590-790	16
62X	530	620-820	15
69X	600	690-890	14
76X	680	760-960	13
78X	680	780-980	13
83X	745	830-1030	12

- 2) Drugi dio predstavlja oznaku koja predstavlja čvrstoću i istezljivost metala zavara, kao što je prikazano tablicom 4.
- 3) Treći dio predstavlja oznaku koja ukazuje na vrijednost udarnog rada loma metala zavara. Oznaka definira temperaturu pri kojoj je postignuta vrijednost udarnog rada loma od 27 J. Potrebno je provesti pet ispitivanja uzoraka pri čemu se najniža i najviša vrijednost odbacuju. Jedna vrijednost udarnog rada loma smije se nalaziti u intervalu 20-27 J, dok preostale dvije ne smiju biti manje od 27 J. Prosječna vrijednost ispitivanih epruveta mora iznositi minimalno 27 J. Slovo U iza ove oznake pokazuje da metal zavara ispunjava neobvezujući zahtjev udarnog rada loma od 47 J.

- 4) Četvrti dio predstavlja oznaku kojom se identificira upotrebljen zaštitni plin. Zaštitni plin označava se sukladno normi HRN EN ISO 14175:2008 – Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke [19].
- 5) Peti dio predstavlja oznaku koja ukazuje na kemijski sastav žičane elektrode, žice ili šipke, te indikaciju karakterističnih legiranih elemenata.

4.2. Uloga zaštitnih plinova pri MAG zavarivanju

Mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala za vrijeme leta kroz električni luk, kao i talina moraju se zaštititi od djelovanja okolne atmosfere. Ta zaštita se uspješno može provesti pomoću odgovarajućih plinova. Postoji mogućnost primjene aktivnih plinova ili njihovih mješavina. Poznavanje utjecaja zaštitnih plinova je neophodno da bi se moglo ocijeniti njihovo djelovanje. Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na:

- Električno-fizikalna svojstva električnog luka i time na prijenos metala s elektrode na radni komad,
- metalurške procese u talini zavara,
- tehnološke parametre.

Pri zavarivanju nelegiranih i niskolegiranih konstrukcijskih čelika mogu se koristiti aktivni plinovi (čisti CO₂) ili mješavine CO₂ sa argonom ili kisikom. Iako je utjecaj kisika štetan za mehanička svojstva zavarenog spoja, on se dodaje argonu i CO₂ jer bitno utječe na površinsku napetost kapljice, odnosno osigurava dobar prijenos metala u sitnim kapljicama [17].

Utjecaj zaštitnih plinova na kvalitetu i svojstva zavarenog spoja određen je fizikalnim svojstvima plina, ionizacijskim potencijalom, toplinskom vodljivosti, disocijacijom i rekombinacijom plinova, kemijskom reaktivnosti, gustoćom i čistoćom plina.

Plinovi koji se koriste kao zaštitna atmosfera kod zavarivanja mogu biti pojedinačni, dvokomponentne, trokomponentne i četverokomponentne mješavine. Komponente mogu biti argon, helij, ugljični dioksid, dušik, kisik i vodik, dok se kao samostalni zaštitni plin mogu koristiti samo argon, helij i ugljični dioksid. Vrste zaštitnih plinova definirane su normom HRN EN ISO 14175:2008: Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke [19].

Najčešće korištene mješavine kod MAG zavarivanja su mješavine argona i ugljičnog dioksida. Ova dvokomponentna mješavina podržava sve načine prijenosa kapljica rastaljenog metala. Svojom toplinskom vodljivošću CO₂ utječe na veću širinu provara, dok se disocijacijom CO₂ u električnom luku oslobađa kisik koji talini daje žitkost i doprinosi stabilizaciji luka. Prijenos metala štrcanjem, kao i prijenos impulsa, zahtijeva da količina CO₂ bude manja od 18 % jer u suprotnom slučaju raste unos topline što može dovesti do

progaranja. Kod prijenosa metala kratkim spojevima koriste se mješavine s udjelom CO₂ jednakim ili većim od 20 % i zahtijeva se opreznost ukoliko se upotrebljava veći udio argona u mješavini.

97,5 % Ar + 2,5 % CO₂ je mješavina koja se najviše koristi za štrcajući prijenos i prijenos metala impulsnim strujama kod nelegiranih i korozijski postojanih čelika. Služi i kod zavarivanja tankih limova velikim brzinama. Najbitnije karakteristike ove mješavine su dobra žitkost taline i velike brzine zavarivanja.

92 % Ar + 8 % CO₂ koristi se kod prijenosa metala štrcajućim lukom, te impulsnim strujama. Veća toplinska vodljivost rezultira povećanjem žitkosti rastaljenog metala.

82 % Ar + 18 % CO₂ je mješavina koja sadrži gornju granicu CO₂ za primjenu metode prijenosa metala štrcajućim lukom. Široki električni luk rezultira kvalitetnijim penetracijskim profilom na mjestu spoja, a mješavina se primjenjuje kod svih načina prijenosa metala.

80 % Ar + 20 % CO₂ je mješavina za široku primjenu koja dodatno reducira prskanje i pridonosi kvalitetnijem izgledu zavara. Najčešća je upotreba kod prijenosa metala kratkim spojevima.

75 % Ar + 25 % CO₂ je mješavina koja smanjuje prskanje i utječe na kvalitetniji izgled zavara kod ugljičnih čelika, a koristi se kod metode prijenosa metala kratkim spojevima.

50 % Ar + 50 % CO₂ je mješavina koja se koristi u slučaju potrebe za visokim unosom topline i dubokom penetracijom, pa se preporučuje za zavarivanje limova debljine veće od 3 mm. Zbog vrlo dobre žitkosti taline moguće je zavarivanje u prisilnim položajima, a prednost je i dobar izgled zavara.

25 % Ar + 75 % CO₂ je mješavina u kojoj je glavni plin CO₂ a argon je tek dodatak kojim se stabilizira električni luk i smanjuje prskanje. Koristi se kod zavarivanja cjevovoda debljih stjenki i najbolja je za postizanje dobrog rubnog spajanja i dubokog provara [20].

4.3. Parametri MAG zavarivanja

Parametri zavarivanja koji značajno utječu na kvalitetu zavarenog spoja MAG postupkom su:

- jakost struje zavarivanja,
- promjer žice,
- napon električnog luka,
- brzina zavarivanja,
- duljina slobodnog kraja žice,
- količina zaštitnog plina.

Optimalna jakost struje zavarivanja ovisi o vrsti i debljini materijala koji se zavaruje, obliku spoja, položaju zavarivanja i promjeru žice kojom će se zavarivati. Jakost struje prilagođava se izborom brzine dovođenja žice, pri čemu je njihov odnos proporcionalan. Porastom jakosti struje povećavaju se penetracija i učinak taljenja. Stoga se ne preporuča prekomjerni porast struje zavarivanja, jer dovodi do većeg prskanja materijala tijekom zavarivanja. Veći promjer žice rezultira većim učinkom taljenja i zahtijeva veću jakost struje. U priručnicima postoje smjernice za izbor jakosti struje, ovisno o promjeru žice.

Za određenu jakost struje zavarivanja bira se optimalni napon električnog luka. Napon električnog luka ovisi o duljini luka koja se ustaljuje kod izjednačavanja brzine dobave i brzine taljenja žice. Prekomjernim porastom napona ili duljine luka smanjuje se zaštita rastaljenog metala, što dovodi do pogoršanja mehaničkih svojstava zavarenog spoja.

Važno je uspostaviti optimalan odnos između količine taline i brzine zavarivanja. Prevelika količina taline i mala brzina zavarivanja, a isto vrijedi i za obratno, dovode do naljepljivanja kao jedne od pogrešaka karakterističnih za MAG postupak zavarivanja.

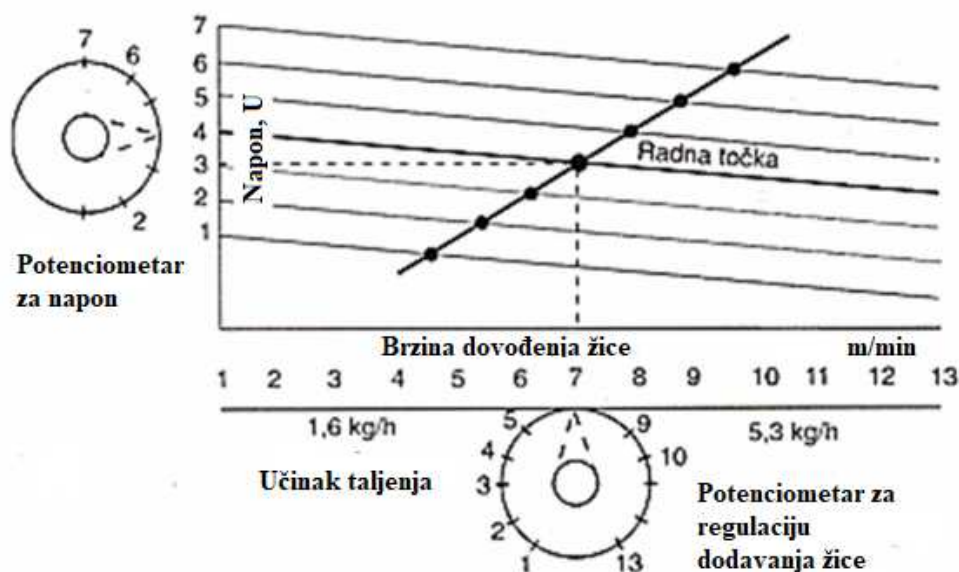
Pravilan nagib pištolja osigurava dobru kontrolu taline i dobar pregled taljene žice. Prevelik nagib pištolja dovodi do manjeg provara i većeg prskanja, što može dovesti do poroznosti u zavarenom spoju.

Slobodni kraj žice je duljina žice od izlaza iz kontaktne vodilice do početka električnog luka, a treba iznositi 13 puta promjer žice, ali maksimalno 20 mm. Znatnije odstupanje dovodi do promjene odnosa napona električnog luka i struje zavarivanja.

Količina zaštitnog plina ovisi o promjeru žice, jakosti struje zavarivanja, obliku spoja, te mjestu i uvjetima zavarivanja. Potrošnja plina znatno se povećava pri zavarivanju na otvorenom prostoru. Kod zavarivanja kutnih spojeva u žlijebu potrošnja plina je manja nego pri zavarivanju sučeljenih spojeva. Premala, kao i prevelika količina zaštitnog plina može dovesti do poroznosti u zavaru.

Do optimalnih parametara zavarivanja dolazi se određenim redoslijedom. Prvo se bira promjer žice, a zatim struja zavarivanja i napon električnog luka. Uspostavljanjem električnog luka uspostavlja se radna točka. Nakon toga se približno namjesti brzina dovođenja žice i traži optimalni položaj radne točke koji se prepoznaje po ravnomjernijem i mirnijem održavanju električnog luka, te manjem rasprskavanju kapljica metala (slika 8).

To znači da se dodatnom finom regulacijom napona traži idealna radna točka koja daje miran i stabilan električni luk, a čime se osigurava kvalitetno provođenje zavarivanja [11].



Slika 8: Prikaz pronalaženja optimalne radne točke za MAG zavarivanje [11]

4.4. Prijenos metala električnim lukom kod MAG zavarivanja

Oblik prijenosa metala električnim lukom pri zavarivanju MAG postupkom ovisi o polaritetu elektrode, jakosti i naponu struje zavarivanja, kemijskom sastavu žice, vrsti zaštitnog plina, te karakteristikama izvora struje za zavarivanje. Ovisno o jakosti struje i naponu električnog luka prijenos metala može se odvijati na 4 načina [11].

1) Kratki luk ($I = 50 - 170 \text{ A}$, $U = 13 - 21 \text{ V}$)

Prijenos metala kratkim lukom upotrebljava se prilikom zavarivanja žicama promjera 0,8, 1,0 i 1,2 mm, a zavarivanje se izvodi kratkim spojevima. Metalna kap na vrhu elektrode se povećava i uslijed male duljine električnog luka u određenom trenutku dodirne rastaljeni metal. Tada nastaje kratki spoj, električni se luk kratkotrajno prekida, a vrijednost napona pada na nulu. Struja zavarivanja u tom trenutku naglo poraste i pomaže otkidanju metalne kapi s vrha elektrode. Nakon otkidanja kapi ponovo se uspostavlja električni luk i čitav ciklus se ponavlja. U jednoj sekundi odvija se 150 – 250 ciklusa. Zbog male količine rastaljenog metala ovakav način zavarivanja pogodan je za zavarivanje tankih limova, korijenskog zvara, te za zavarivanje u prisilnim položajima.

2) Prijelazni (mješoviti) luk ($I = 170 - 235 \text{ A}$, $U = 22 - 25 \text{ V}$)

Prijenos metala mješovitim lukom odvija se djelomično kratkim spojevima, a djelomično prolazom kapi kroz luk (kao pri zavarivanju štrcajućim lukom). Pri tome je omogućeno

otkidanje manjih kapi što dovodi do prilično izraženog prskanja kapljica rastaljenog metala. Prskanje kapljica manje je u mješavinama plina Ar + CO₂ nego u čistom CO₂.

3) Štrcajući luk ($I = 200 - 600 \text{ A}$, $U = 25 - 40 \text{ V}$)

Prijenos metala štrcajućim lukom karakteriziraju visok napon i jaka struja zavarivanja. Kod vrlo velikih struja i povišenih napona dolazi do snažnog tzv. „pinch – efekta“ koji dovodi do odvajanja mlaza finih kapljica koje prelaze u kupku. Zbog brzog prijelaza vrijeme zagrijavanja kapi na vrhu elektrode je kratko, što skraćuje vrijeme trajanja metalurških reakcija i rezultira je malim odgorom legirajućih i pratećih elemenata. Štrcajući luk karakterizira prijenos sitnih metalnih kapljica u mlazu slobodnim letom bez kratkih spojeva i uz stalno održavanje električnog luka. Budući da je gustoća struje veća od 300 A/mm^2 , postiže se visok učinak taljenja i visoka ekonomičnost. Štrcajući luk primjenjuje se kod zavarivanja žicama najvećeg promjera ($1,2 - 2,0 \text{ mm}$), kod popunjavanja žlijebova na debelim limovima i navarivanja. Zbog velikog unosa topline penetracija u metal je duboka, te je zavarivanje štrcajućim lukom pogodno za zavarivanje debelih komada, ali samo u vodoravnom položaju jer bi u protivnom talina iscurila.

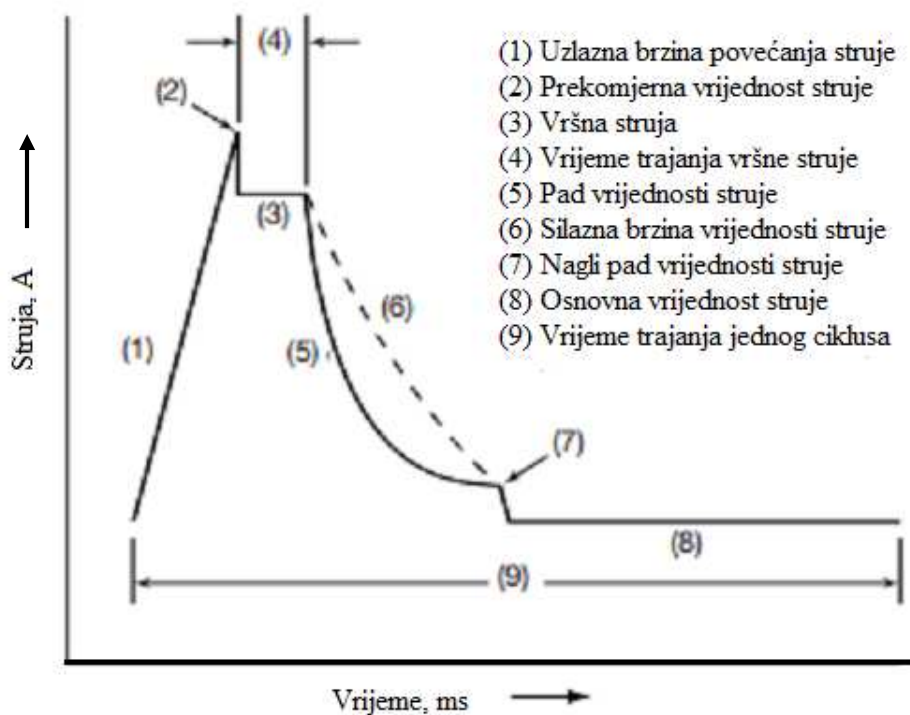
4) Impulsni luk

Pri zavarivanju impulsnim MAG postupkom prijenos metala je slobodnim letom kapljice bez kratkih spojeva. Takav prijenos metala može se realizirati i kod struja zavarivanja manjih od kritičnih, u području struja kod kojih je pri klasičnom MAG zavarivanju prijenos metala kratkim spojevima. To se može postići jer je vrijednost maksimalne struje impulsa I_p takva da zbog elektromagnetskih sila na vrhu žice kapljica biva otkinuta i izbačena prema talini u svim položajima zavarivanja. Na taj se način lijepo i kontrolirano zavaruju tanki materijali i provaruju korijeni, a zavarivanje se može izvoditi u prisilnim položajima. Na slici 9 može se vidjeti oblik struje kod impulsnog zavarivanja u ovisnosti o vremenu.

Primjena MAGM impulsnog zavarivanja za zavarivanje svih vrsta čelika ima slijedeće prednosti pred klasičnim MAG zavarivanjem:

- a) Primjenom mješavine plinova i impulsne struje za zavarivanje postiže se povoljniji prijenos metala, bez kratkih spojeva, izgled zavara je jednolik i gladak, a i kemijsko metalurški sastav zavara je ujednačeniji.
- b) Uslijed smanjenja štrcanja manji su gubici materijala i nije potrebno čišćenje površine radnog komada od kapljica metala, a pri automatskom i robotiziranom zavarivanju izbjegnuto je onečišćenje sapnica.
- c) Deformacije uslijed zavarivanja su manje radi manjeg unosa topline.
- d) Zavarivanje je moguće izvoditi uz manje struje i primjenu žica većih promjera.

- e) Moguće je ostvariti slobodan let kapljice i u prisilnim položajima zavarivanja, te izbjeći neke nedostatke zavarivanja kratkim spojevima.
- f) Poboljšana i olakšana je kontrola parametara zavarivanja, kao i odabiranje optimalnih parametara zavarivanja razvojem „synergic“ MAG zavarivanja [11, 17].



Slika 9: Vremenski tok struje kod impulsnog zavarivanja [21]

Prijenos metala u kratkom, prijelaznom i štrcajućem luku spada u tzv. prirodni prijenos metala. Kod zavarivanja kratkim spojem zbog naglog porasta struje dolazi do znatnog prskanja metala u trenutku kratkog spoja između žice i taline. Najveći gubitak materijala prskanjem (3 – 6%) nastaje pri zavarivanju prijelaznim lukom jer se metal prenosi i kratkim spojevima i slobodnim letom kapljice kroz električni luk.

4.5. Pogreške kod MAG zavarivanja

Najčešće pogreške u zavarenom spoju izvedenom MAG postupkom zavarivanja su poroznost, nepotpuno spajanje (naljepljivanje ili tzv. „hladna mjesta“), ukljucci, pukotine itd.

Uzroci poroznosti su nečistoće na mjestu zavarivanja, nečista površina žice, nejednolično dovođenje žice, vlaga u zaštitnom plinu, nečista sapnica, prevelik nagib pištolja, neodgovarajuća količina zaštitnog plina, preveliki napon električnog luka itd. (slika 10).



Slika 10: Pore u korijenu kod MAG zavarivanja čelika [10]

Uzroci naljepljivanja su premala jakost struje zavarivanja, neodgovarajuća brzina zavarivanja, prebrzo i preširoko poprečno gibanje pištolja, premali kut otvora žlijeba, oksidirana ili neravna površina žlijeba itd. (slika 11).



Slika 11: Naljepljivanje između slojeva zavara [10]

Nastajanje uključaka u zavaru uglavnom je posljedica nečiste i nekvalitetno izvedene pripreme spoja, te nedovoljnog čišćenja između slojeva kod višeslojnog zavarivanja (slika 12).



Slika 12: Uključci troske u zavarenom spoju [10]

Hladne ili tople pukotine u zavarenom spoju rjeđe se pojavljuju kod MAG zavarivanja nego kod drugih postupaka. U slučaju njihovog nastanka najčešći uzroci su neodgovarajući izbor dodatnog materijala, neprovođenje potrebnih uvjeta za predgrijavanje, nepravilna tehnika prekidanja zavarivanja itd. (slika 13) [10, 11].



Slika 13: Topla pukotina u metalu zavara [10]

4.6. MAG postupak zavarivanja praškom punjenom žicom

Osnovna dva pokazatelja koji karakteriziraju zavarivačku proizvodnju su kvaliteta zavarenog spoja i produktivnost. Kvalitetu zavarenog spoja bezuvjetno treba održavati na potrebnoj i zahtijevanoj razini, dok u pogledu produktivnosti postoji stalna težnja ka povećavanju iste. Ako se za proizvod u uhodanoj i provjerenoj tehnologiji izrade želi povećati produktivnost, a da se pri tome ne investira u nove postupke zavarivanja ili zavarivačku opremu, tada se može već i samom promjenom dodatnog materijala utjecati na povećanje proizvodnosti.

Povećanje produktivnosti može se očitovati kroz slijedeće parametre:

- povećanje koeficijenta taljenja primjenom većih struja zavarivanja;
- mogućnost zavarivanja zavara većih debljina u jednom prolazu;
- mogućnost zavarivanja u više položaja zavarivanja istim postupkom;
- bolji izgled lica zavara bez zajeda, neravnina ili kapljica od rasprskavanja;
- korištenje iste opreme za više načina zavarivanja, itd.

Svi se ovi parametri mogu bez poteškoća ostvariti pri MAG zavarivanju primjenom punjene žice umjesto klasične pune žice.

MAG zavarivanje punjenom žicom primjenjuje se najčešće u masovnoj proizvodnji, zavarivanju nelegiranih konstrukcijskih čelika, kao npr. u brodogradnji. Međutim, sve se više primjenjuje i u zavarivanju dijelova od niskolegiranih i visokolegiranih konstrukcijskih čelika u procesnoj i energetske industriji, gradnji vozila, mostova, u zanatstvu itd. [22].

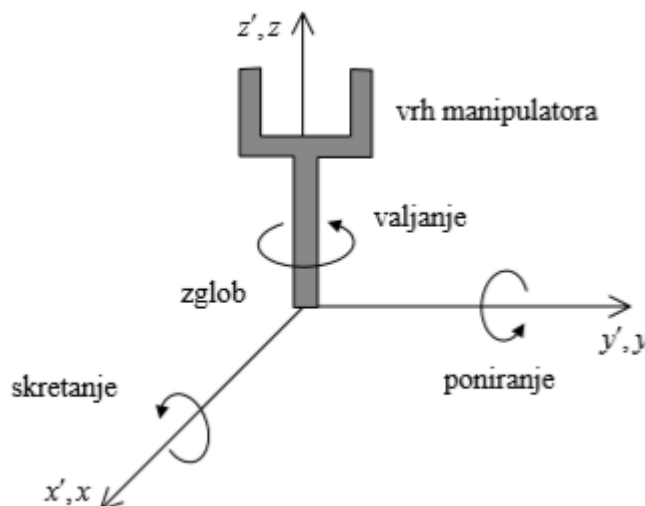
4.7. ROBOTIZIRANO MAG ZAVARIVANJE

Računalno upravljanje robotskim sustavima teži primjeni ekspertnih sustava i umjetne inteligencije u području automatskog upravljanja. Temeljni trend u robotici odnosi se na mobilnost, inteligenciju i autonomnost u nestrukturiranoj sredini. Ovaj trend je moguće postići upotrebom malih i jeftinih računala visokih performansi. Termin robot u ovom kontekstu predstavlja sustav koji je sposoban ostvariti predviđena ponašanja u realnom okolišu [23].

4.7.1. Općenite značajke robota

Za određivanje orijentacije vrha manipulatora potrebno je definirati tri rotacije oko različitih osi: osi skretanja, osi poniranja i osi valjanja (slika 14). Za potpunu kontrolu orijentacije vrha manipulatora (npr. pištolj za zavarivanje) potrebne su još tri osi. Neke robotske konfiguracije

kompromisno mijenjaju ograničenja kod kretanja u zamjenu za cijenu, brzinu i preciznost same konfiguracije.



Slika 14: Skretanje, poniranje i valjanje vrha manipulatora [23]

Karakteristične značajke robota su:

- stupnjevi slobode - obično ih definiraju broj i vrsta osi,
- radni prostor - skup svih točaka u prostoru koje robot može dosegnuti,
- struktura robota - opisuje vrste članova koji određuju moguća gibanja robota, a vrste struktura uključuju pravokutnu, cilindričnu, sfernu i rotacijsku,
- nosivost robota - nazivna masa s kojom robot može manipulirati,
- brzina - opisuje vrijeme potrebno da robot pozicionira izvršni (alatni) koordinatni sustav u željenu poziciju,
- ubrzanje - opisuje koliko brzo robot može ubrzati promjenu pozicije,
- preciznost - opisuje s kojim odstupanjem se robot pozicionira u zadanu poziciju,
- ponovljivost - opisuje s kojom preciznošću se robot vraća u programiranu poziciju,
- kontrola kretnji - ovisno o zadatku kojeg robot izvršava, kretnje moraju biti isključivo kontinuirane (npr. zavarivanje), ili nekog drugog oblika,
- vrsta pokretne sile - vrste pogonskih motora i aktuatora u zglobovima robota,
- prijenos - postoje direktni spojevi na zglobove i upotreba mjenjačkih mehanizama,
- popustljivost - značajka koja opisuje manje promjene položaja kod velikog opterećenja robota [24].

Postupci zavarivanja pogodni za robotiziranje su:

- MIG/MAG zavarivanje,
- TIG zavarivanje,
- EPP zavarivanje,
- lasersko zavarivanje,
- plazma zavarivanje,
- elektrootporno zavarivanje.

4.7.2. Podjela industrijskih robota

Obzirom na složenost strukture robota niti podjela industrijskih robota ne može biti jednostavna, samo u jednoj kategoriji. Stoga robote možemo općenito podijeliti prema vrsti pogona, načinu upravljanja gibanjem, te geometriji radnog prostora [25].

1) Podjela prema vrsti pogona:

- električni pogon,
- hidraulički pogon,
- pneumatski pogon.

2) Podjela prema načinu upravljanja gibanjem:

- od točke do točke (nije važna putanja već točnost pozicioniranja),
- kontinuirano gibanje po zadanoj putanji (važna je putanja i točnost pozicioniranja).

3) Podjela prema geometriji radnog prostora:

- pravokutna ili TTT struktura,
- cilindrična ili RTT struktura,
- sferna ili RRT struktura,
- rotacijska ili RRR struktura,
- SCARA robot.

4.7.3. Glavne komponente robotske stanice za zavarivanje

Glavne komponente robotske stanice za zavarivanje su:

- robot za zavarivanje,
- izvor struje,

- upravljačko računalno,
- privjesak za učenje.



Slika 15: Glavne komponente robotske stanice za zavarivanje [26]

4.7.4. Robotizirano MAG zavarivanje

Roboti za zavarivanje su po definiciji automatski strojevi za zavarivanje koji imaju više od tri stupnja slobode gibanja, a upravljanje se obavlja pomoću računala s mogućnošću programiranja i učenja. Zavarivače i transportne radnike na proizvodnim linijama tvornica automobila sve više zamjenjuju roboti i automati za zavarivanje. Razvoj i automatizacija zavarivanja temelje se na primjeni različitih senzora i računala za praćenje, bilježenje i upravljanje parametrima zavarivanja, uz predviđanje grešaka i istodobno uklanjanje njihovih uzroka [27].

Na slici 16 može se vidjeti robot Fanuc ARC Mate 100iC/12 sa šest osi namijenjen za elektrolučno zavarivanje.



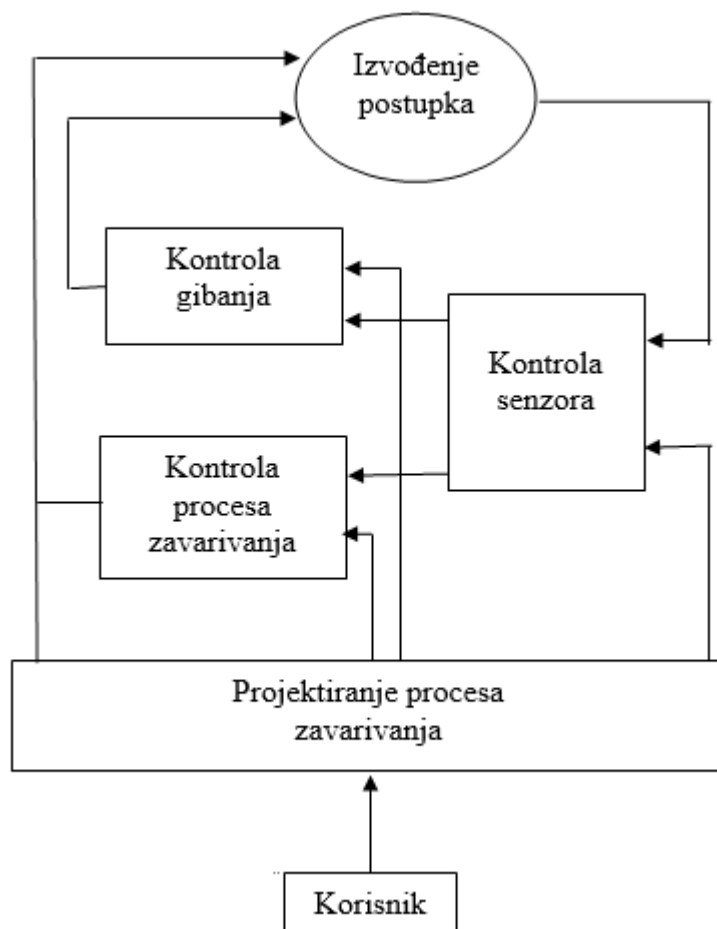
Slika 16: Robot Fanuc za elektrolučno zavarivanje [28]

Elektrolučno zavarivanje pogodno je za automatizaciju zbog nekoliko značajnih razloga:

- okoliš štetan za ljudsko zdravlje uslijed izlaganja intenzivnoj toplini i plinovima koji nastaju u procesu zavarivanja
- značajno povećanje kvalitete zavarenih spojeva zbog smanjenja broja prekida procesa uslijed izostanka umora i većeg radnog opsega robotske ruke u odnosu na ljudsku
- precizna kontrola procesa može značajno povećati produktivnost, čak šest puta više u odnosu na radnika zavarivača
- proces zavarivanja ima značajan industrijski značaj, obimnija primjena robota prisutna je samo u procesima montaže, strojne obrade, te naročito kod rukovanja materijalom

Zavarivanje je složen proces s velikim brojem parametara. Neke odluke zavarivač može donijeti tijekom samog postupka zavarivanja na osnovu prethodnog iskustva. Neki parametri, kao što su duljina žice i orijentacija, mogu se odrediti na temelju podataka koje zavarivač može dobiti vizualno i osluškujući zvuk iz električnog luka. Za više informacija o procesu zavarivanja, kao i za suvremene tehnologije zavarivanja, svakako se preporučuje viši stupanj automatizacije samog postupka.

Na slici 17 prikazana je karakteristična struktura prilagodljivog sustava upravljanja kod robotiziranog MAG zavarivanja.



Slika 17: Struktura sustava upravljanja kod robotiziranog zavarivanja [29]

Sustav se sastoji od sljedećih komponenti:

1) **Senzori i obrada očitanih vrijednosti (Sensory processing)**

Modul za obradu senzora odgovoran je za dobivanje željenih parametara opisujući fizički okoliš. Za registriranje informacija o procesu mogu se upotrijebiti razni senzori, a među njima su:

- laser pričvršćen za robotsku ruku za precizno pozicioniranje,
- IR senzor ili CCD kamera za nadzor taline,
- uređaji za kontinuirano praćenje parametara u električnom luku,
- zvučni senzori koji registriraju uobičajene zvukove tijekom procesa zavarivanja.

2) Kontrola procesa zavarivanja (Weld proces controller)

Kako bi se osigurala dobra kvaliteta zavarenog spoja, u uređaju za zavarivanje potrebno je kontinuirano podešavanje tri osnovna parametra, a to su brzina zavarivanja, napon struje i brzina žice. Postoji također i niz različitih parametara koji imaju statičniju prirodu. Količina zaštitnog plina regulira se prije i nakon prolaza, a ne tijekom postupka, dok neki parametri prilikom pokretanja i završavanja postupka osiguravaju kontinuiranost procesa.

3) Kontrola gibanja (Trajectory controller)

Središnji modul kod robotiziranog zavarivanja je kontrola putanje. Glavna zadaća mu je pokretanje pištolja do optimalnog položaja i njegova orijentacija u odnosu na spoj.

4) Projektiranje procesa zavarivanja (Weld task planner)

Na osnovu podataka iz WPS-a provodi postupak zavarivanja i nadzire ostale module tijekom procesa. U WPS-u se nalazi velika količina informacija uključujući:

- debljinu obratka i sastav materijala,
- vrstu i geometriju spoja,
- postavke uređaja za zavarivanje,
- redoslijed zavarivanja, kako bi se izbjegla naprezanja i toplinske deformacije, itd.

Ovaj modul predstavlja najvažniju vezu između korisnika s jedne, te procesa zavarivanja i kontrole nad robotom s druge strane. Zbog toga je daljnji razvoj ovog modula od najveće važnosti za povećanje stupnja automatizacije procesa zavarivanja [29].

5. ČELIK API 5L X80

Područje primjene čelika API 5L X80 je vrlo široko. Primjenjuje se kod izgradnje cjevovoda, podmornica, off-shore postrojenja, itd. Zbog povećanja omjera čvrstoće prema masi, prvenstveno se primjenjuje na konstrukcijama kod kojih se teži ka smanjenju mase konstrukcije i uštedi materijala.

Čelik API 5L X80 proizveden je termo-mehanički kontroliranim procesom valjanja (TMCP) kod kojeg se u točno definiranom proizvodnom postupku s reguliranim vremenima hlađenja dobiva ciljana mikro struktura svojstava visoke čvrstoće i dobre žilavosti, te dobra

zavarljivost. Kod TMCP-a valjanje se odvija ispod temperature rekristalizacije te se čelik podvrgava ubrzanom kontroliranom hlađenju. Usitnjenje zrna dobiva se dodavanjem mikrolegirnih elemenata pri čemu se postiže veličine zrna od 5-10 μm , što rezultira visokom čvrstoćom i dobrom žilavošću. Međutim, zavarivanjem, naglim temperaturnim i mikrostrukturnim promjenama izvan kontroliranih uvjeta, stvara se diskontinuitet materijala u zoni zavarenog spoja kod kojeg je moguće očekivati pojavu pukotina. Ovakvi materijali, proizvedeni modernim tehnologijama, izazov su proizvođačima dodatnih materijala koji moraju osigurati takav dodatni materijal za zavarivanje s kojim će se moći ostvariti integritet konstrukcije izjednačavanjem svojstava osnovnog materijala i zone zavora. Greške koje se javljaju u metalu zavora mogu biti posljedica neodgovarajućeg odabira dodatnog materijala. Mehanička svojstva čelika API 5L X80 prikazana su u tablici 5 (prema normi API 5L).

Tablica 5: Svojstva čelika API 5L X80 prema normi API 5L [3]

	Granica razvlačenja $R_e, \text{N/mm}^2$		Vlačna čvrstoća $R_m \text{N/mm}^2$	
	Minimalna	Maksimalna	Minimalna	Maksimalna
X80	552	690	621	827

Obzirom na povećanje operativnih i eksploatacijskih zahtjeva, raste potreba za čvršćim čelicima pri izgradnji cjevovoda. Čelik gradacije API 5L X80 ispunjava zahtjeve kao materijal za visoko tlačne cjevovode zbog visoke čvrstoće i dobre žilavosti. Hladne pukotine u literaturi se nazivaju i zakašnjelim pukotinama, te danas predstavljaju jedan od najčešćih problema u zavarivačkoj praksi. Dominantni uvjeti za nastanak hladnih pukotina su: osjetljiva mikro struktura, sadržaj vodika i stanje naprezanja.

Hladne pukotine nastaju pri temperaturama nižim od 300 °C, a karakteristično za njih je to što se mogu pojaviti nekoliko sati, ili čak dana nakon zavarivanja. Opasnost od pojave hladnih pukotina raste s povećanjem čvrstoće materijala, te kod zavarivanja materijala s debljom stjenkom gdje je potrebno ostvariti zavareni spoj u više prolaza.

Za zavarivanje čelika API 5L X80 u praksi se najčešće primjenjuju MAG i FCAW (praškom punjena žica) postupci zavarivanja. Moguće su veće količine nataljenog materijala uz podešavanje parametara zavarivanja čime se povećava produktivnost.

Međutim, vrlo veliki naglasak se stavlja na dodatni materijal, te uvjete zavarivanja. Vodik se pri postupku zavarivanja razlaže na vodikove ione koji vrlo lako ulaze u rastaljeni metal.

Kako se zavareni spoj hladi, monoatomarni vodik ostaje u metalu difundirajući kroz zone utjecaja topline, metala zavora i osnovnog materijala. Na putu difuzije vodik djeluje

interaktivno s raznim mikro strukturnim nepravilnostima (šupljinama, dislokacijama, prazninama, granicama zrna i uključcima). Značajke zavarenih spojeva u velikoj mjeri ovise o homogenosti između mehaničkih svojstava osnovnog materijala i zavarenog spoja. Kod MAG postupka zavarivanja, uz mješavinu zaštitnog plina Ar i CO₂, unosi se najmanje vodika zbog kontrolirane zaštitne atmosfere, ali vodik se i dalje može apsorbirati iz vlage dodatnog ili osnovnog materijala.

Razlikuju se dvije inačice termomehaničkog valjanja čelika: V-Nb-čelici (X70) i noviji Mn-Mo-Nb-čelici (X80). Razlika između ovih čelika je u ponašanju transformacije. Naime, V-Nb-čelici postižu transformaciju u feritno-perlitnom stadiju, te realiziraju najveće precipitacijsko otvrdnjavanje za vrijeme hlađenja nakon valjanja. Različito ponašanje imaju Mn-Mo-Nb-čelici koji zbog dodatka Mo i povećanja Mn imaju pomaknutu feritno-perlitnu transformaciju koja se odvija u međufazi. Kako bi se mogla postići struktura igličastog ferita koja ima dobru otpornost prema vodikovim pukotinama udio ugljika ne smije biti veći od 0,06%. Uobičajeni prikaz kemijskog sastava čelika gradacije API 5L X80 predložen je u tablici 6.

Tablica 6: Uobičajeni kemijski sastav čelika API 5L X80 [3]

Oznaka prema API 5L	%									
X80	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
	0,07	0,35	1,94	0,015	0,00	0,15	0,01	0,001	0,01	0,027
P _{cm}	0,18									

Opisanim termo-mehaničkim procesima valjanja dobivaju se čelici koji imaju vrlo nizak sadržaj ugljika i nečistoća, te zahvaljujući niskom ekvivalentu ugljika garantiraju dobru zavarljivost. Visokočvrsti čelici, s granicom razvlačenja od 420 do 690 [N/mm²] osjetljivi su na pojavu hladnih pukotina. Za vrijeme zavarivanja se u materijal može unijeti opasna koncentracija vodika koja će znatno smanjiti duktilnost metala. Takvi materijali pokazuju manju osjetljivost prema pojavi hladnih pukotina u zoni utjecaja topline. Međutim, metal zavara je postao osjetljiviji na pojavu hladnih pukotina. Za zavarivačku praksu, ova pojava se smatra još većom prijetnjom zbog otežane mogućnost kontrole mikro strukture, gdje veliku

ulogu u formiranju spoja i njegovim mehaničkim svojstvima igraju dodatni materijali. Kemijski sastav i mikro struktura metala zavara kao i mehanička svojstva moraju odgovarati modernim čelicima dobivenim termo-mehaničkim valjanjem.

Većina hladnih pukotina inicirana je od uključaka Mn, Al, Ca i Ti, a mogu se širiti transgranularno ili intergranularno, ovisno o režimu hlađenja materijala. U čeliku X80 najčešće se javljaju 3 vrste uključaka: na bazi Mn, Al i Si. Dokazano je kako su uključci na bazi Mn i Al bili mjesta iniciranja pukotina, dok isto nije bilo uočeno kod čelika s uključcima na bazi Si. Mikrolegirni elementi utječu na pojavu hladnih pukotina djelovanjem na čvrstoću, mikro strukturu i segregaciju. Iskustva pokazuju kako na vodikovu krhkost u ZUTu utječu mikro struktura i tvrdoća.

Od velikog je značenja utjecaj unosa topline i temperature predgrijavanja na sadržaj difundiranog vodika kod čelika iz skupine API 5L X80. Izračun unosa topline prilikom zavarivanja obuhvaća dio parametara zavarivanja kao što su: struja, napon i brzina zavarivanja. Međutim, na sadržaj vodika utječu i udaljenost sapnice od radnog komada, nagib pištolja, vrsta zaštitnog plina itd. Parametrima zavarivanja i režimima hlađenja može se uvelike utjecati na strukturu materijala, može se regulirati pojavu naprezanja, ali najznačajniji čimbenik, vodik, vrlo je teško kontrolirati uz zadržavanje minimalnih troškova proizvodnje.

Predgrijavanje je proces koji se provodi u svrhu usporavanja procesa hlađenja materijala nakon zavarivanja. Na taj način vodik ima dovoljno vremena za izlazak iz materijala, a u protivnom, naglim hlađenjem, vodik ostaje zarobljen u metalu i može uzrokovati pojavu hladnih pukotina. Odabir odgovarajuće temperature predgrijavanja bazira se na količini vodika koji bi se kroz proces zavarivanja mogao unijeti u materijal, na naprezanju unutar materijala uslijed konfiguracije zavarenog spoja, na čvrstoći materijala, kemijskom sastavu i debljini, te osjetljivosti materijala prema vodikom induciranim pukotinama uz nagle režime hlađenja [3,30].

6. EKSPERIMENTALNI RAD

6.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Cilj eksperimentalnog rada je odrediti utjecaj unesene topline i vrste zaštitnog plina na kvalitetu i mehanička svojstva metala zavara mikrolegiranog čelika visoke čvrstoće.

Za postupak zavarivanja odabran je elektrolučni postupak zavarivanja punom žicom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina, MAG (135 – oznaka prema HRN EN ISO 4063:2012 – Zavarivanje i srodni postupci – Nomenklatura postupka i referentni brojevi [34]). Kao dodatni

materijal (kontinuirana elektroda) odabrana je žica za MAG zavarivanje LNM MoNi proizvođača Lincoln Electric promjera $d_z = 1,2$ mm

Kao zaštitni plinovi odabrane su dvije plinske mješavine (82% Ar/18% CO₂ i 92% Ar/8% CO₂), dok se zavarivanje provodi sa dva različita unosa topline (13 i 23 kJ/cm). Za unose topline odabrani su parametri koji osiguravaju stabilan električni luk i dovoljnu količinu nataljenog materijala potrebnog za provedbu planiranih ispitivanja. Parametri su odabrani na temelju proučene literature i pokusnog zavarivanja.

Prema osmišljenom konceptu istraživanja za izradu diplomskog rada, planirano je provođenje eksperimenta u 4 glavne faze.

U prvoj fazi određeni su unosi topline i parametri zavarivanja, te provedeno pokusno zavarivanje. Nakon odabranih parametara, u drugoj fazi vrši se zavarivanje ploča i izrada ispitnih uzoraka. Treća faza obuhvaća vlačni pokus i ispitivanje udarnog rada loma, dok četvrta faza obuhvaća obradu i analizu dobivenih podataka, te analizu makro uzorka.

6.2. Oblikovanje plana pokusa

U eksperimentalnom radu razmatrane su dvije ulazne varijable: vrsta zaštitnog plina i količina unesene topline. Svaka od njih ima dva nivoa vrijednosti pa je moguće načiniti $2^2 = 4$ stanja pokusa.

U tablici 7 prikazane su sve razine stanja pokusa.

Tablica 7: Razine stanja pokusa

API 5L X 80		ULAZNE VARIJABLE			
		82 % Ar/ 18 % CO ₂	92 % Ar/ 8 % CO ₂	$Q_1 = 13$ kJ/cm	$Q_2 = 23$ kJ/cm
STANJE POKUSA	1	X		X	
	2	X			X
	3		X	X	
	4		X		X

6.3. Osnovni materijal

Ispitivanja u eksperimentalnom dijelu rada provedena su na mikrolegiranom visokočvrstom čeliku oznake API 5L X80. Norma API (American Petroleum Institute) specificira gradaciju čelika za cjevovode. Oznaka X predstavlja seriju na temelju mehaničkih svojstava, a broj 80 označava granicu razvlačenja čelika u tisućama funti po kvadratnom inch-u (psi – pound per square inch). Čelik API 5L X80 ima granicu razvlačenja 555 N/mm^2 (80 500 psi).

Čelik API 5L X80 na tržište dolazi s različitim kemijskim sastavom i strukturama, ali uvijek u istom području iznosa mehaničkih svojstava. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika API 5L X80 korištenog u eksperimentu navedena su u poglavlju 5.

Čelik API 5L X80 ima sitnozrnatu mikrostrukturu sastavljenu od bainita i ferita, što za posljedicu ima povećanje čvrstoće, povećanje udarnog rada loma i duktilnosti, te povećanje dinamičke izdržljivosti. Pored toga, povećava se i otpornost na vodikovu krhkost [20].

Čelik za izradu ispitnih uzoraka izrezan je u ploče dimenzija 350 mm x 125 mm x 10 mm.

6.4. Zaštitni plin

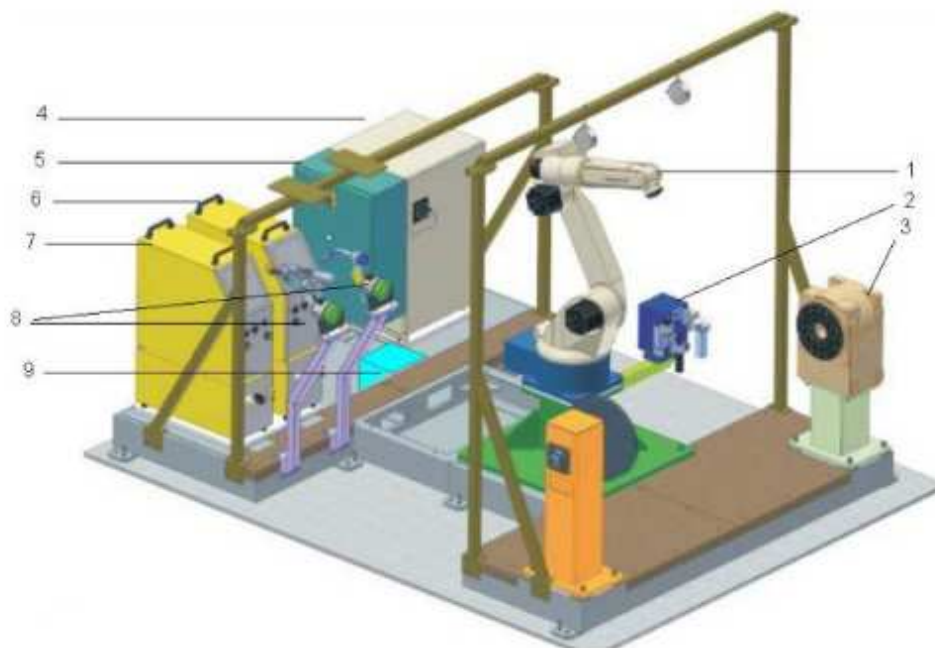
Svrha eksperimentalnog rada je ispitivanje utjecaja zaštitnog plina na svojstva metala zavora, pa su u tu svrhu korištene dvije plinske mješavine. Protok zaštitnog plina prilikom zavarivanja svih ploča iznosio je 20 l/min.

Oznake plinskih mješavina korištenih pri zavarivanju prema normi HRN EN ISO 14175:2008 : Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke [19], su slijedeće:

- 1) M 20 (92 % Ar, 8 % CO₂)
- 2) M 21 (82 % Ar, 18 % CO₂)

6.5. Izrada upravljačkog programa na robotskoj jedinici ALMEGA AX - V6

U eksperimentalnom dijelu rada za zavarivanje ploča korištena je robotska jedinica Almega AX - V6, čime je izbjegnuto utjecaj tehnike zavarivanja na mehanička svojstva i izgled zavarenog spoja, do kojeg bi inače došlo prilikom ručnog zavarivanja. Robotska jedinica nalazi se u Laboratoriju za zavarene konstrukcije FSB-a u sklopu robotske stanice VRC – 1G MIG + 1G TIG/1dm, na slici 18.



Slika 18: Shematski prikaz robotske stanice VRC – 1G MIG + 1G TIG/1dm

Komponente robotske stanice su slijedeće:

- 1) Robot OTC Almega AX – V6, slika 19
- 2) Uređaj za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja
- 3) Sustav za pozicioniranje P250V ROBO
- 4) Električna jedinica
- 5) Upravljačka jedinica
- 6) Izvor struje MIG/MAG VPS 4000
- 7) Izvor struje TIG VARTIG 3500 DC/AC
- 8) Sustav za automatsku izmjenu pištolja
- 9) Senzor električnog luka AX – AR

Programi korišteni za zavarivanje uzoraka prema stanjima pokusa načinjeni su korištenjem sustava za programiranje na samoj robotskoj jedinici. Nakon što su programom određeni parametri: brzina i nagib pištolja, kretanje pištolja i njihanje, određeni su parametri zavarivanja – struja, napon, slobodni kraj žice i protok zaštitnog plina.

Pošto su parametri zavarivanja u različitim stanjima pokusa bili vrlo različiti, bilo je potrebno izvršiti određene promjene i na upravljačkom programu robotske jedinice. To se naročito odnosi na tehniku njihanja koja je bila potrebna kad je zbog većeg unosa topline nastala potreba za kontrolom veće količine taline. Na slici 19 može se vidjeti robotska jedinica Almega AX – V6 nakon zavarivanja probnog uzorka.



Slika 19: Robotska jedinica Almega AX – V6

Prije drugog prolaza, prilikom zavarivanja uzoraka 2 i 4, bilo je potrebno definirati vrijednosti koje određuju putanju i brzinu njihanja. Kao funkcija njihanja odabrana je kružna funkcija s radijusom $r = 4,5$ mm, vrijeme zadržavanja električnog luka na obje strane lima iznosilo je 0,2 s, uz frekvenciju njihanja 2,5 Hz.

6.6. Dodatni materijal

Prilikom zavarivanja korištena je žica za MAG zavarivanje LNM MoNi proizvođača Lincoln Electric promjera $d = 1,2$ mm, čiji je certifikat u prilogu. Žica je klasificirana kao dodatni materijal pri zavarivanju visokočvrstih čelika i zadovoljava zahtjeve na udarni rad loma do -60 °C. Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su u tablici 8.

Tablica 8: Mehanička svojstva žice LNM MoNi

$R_e, \text{N/mm}^2$	$R_m, \text{N/mm}^2$	$A, \%$	udarni rad loma KV, J		
			- 20 °C	- 40 °C	- 60 °C
635	770	19	100	90	70

Kemijski sastav žice prikazan je u tablici 9.

Tablica 9: Kemijski sastav žice LNM MoNi

C, %	Mn, %	Si, %	Ni, %	Cr, %	Mo, %	Cu, %	Fe, %
0,1	1,65	0,75	0,55	0,6	0,3	0,08	ostalo

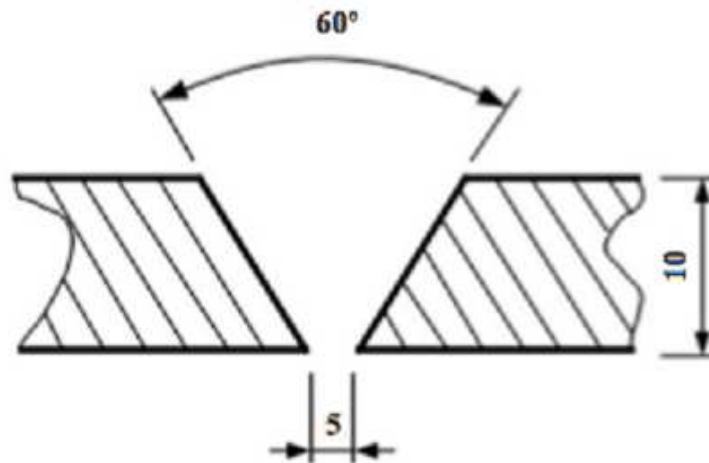
Na slici 20 može se vidjeti kolut žice korištenog dodatnog materijala LNM MoNi i mehanizam za dodavanje žice.



Slika 20: Kolut žice LNM MoNi i mehanizam za dodavanje žice

6.7. Priprema spoja

Priprema spoja provedena je na temelju proučene literature i planiranih ispitivanja metala zavora. Priprema je izvedena kao V – spoj pod kutom od 60° , dok je razmak između ploča iznosio 5 mm (slika 21).



Slika 21: Priprema spoja

Povećan razmak između ploča uvjetovan je potrebom za većim dimenzijama poprečnog presjeka metala zavora zbog planiranog statičkog vlačnog pokusa metala zavora. Ukoliko zbog loše pripreme spoja dođe do prevelikog smicanja i razmicanja ploča, korijenski zavar neće biti kvalitetno izveden. Ukoliko korijenski zavar nije izveden dobro, cijeli zavareni spoj bit će loše kvalitete, budući da popuna i završni sloj ovise o dobro izvedenom korijenskom zavaru.

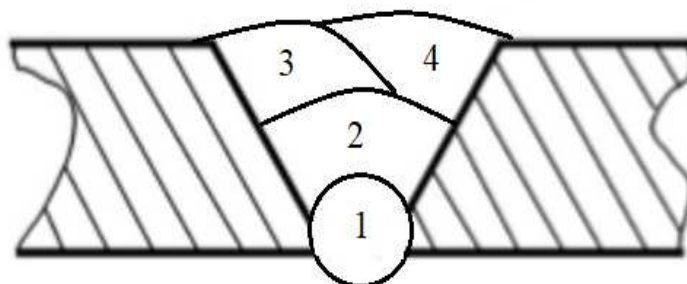
Radi osiguranja kvalitetne pripreme zavarenog spoja predviđena strojna obrada rubova ploča. Ploče dimenzija $350 \text{ mm} \times 125 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ su pozicionirane na zahtijevani razmak od 5 mm i zavarene za podlogu. Podloga je ploča izrađena od istog materijala, čelika API 5L X80, kao što se može vidjeti na slici 22. Na slici se mogu vidjeti i naprave za stezanje koje su korištene za pričvršćivanje ploča koje se zavaruju.



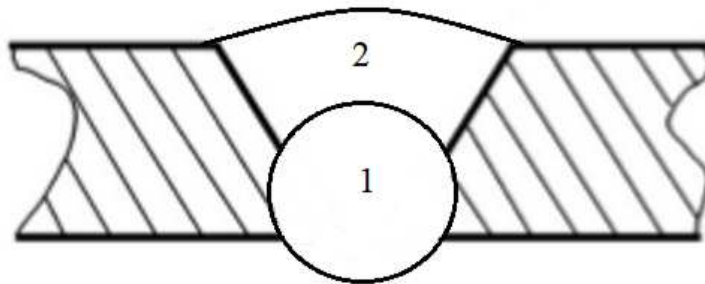
Slika 22: Pozicioniranje ploča za zavarivanje na podlozi

6.8. Zavarivanje ploča

Zavarivanje ploča provedeno je pomoću robotske jedinice Almega AX - V6. Kod uzoraka kod kojih je planiran manji unos topline (13 kJ/cm) zavareni spoj je izveden sa 4 prolaza, dok su uzorci sa većim unosom topline (23 kJ/cm) zavareni u dva prolaza. Redoslijed polaganja slojeva može se vidjeti na slikama 23 i 24.



Slika 23: Redoslijed polaganja slojeva na uzorcima 1 i 3



Slika 24: Redoslijed polaganja slojeva na uzorcima 2 i 4

Zavarivanje uzoraka 1 i 3, kao i korijenskih zavora na uzorcima 2 i 4, provedeno je bez njihanja, dok je kod zavarivanja lica zavora na uzorcima 2 i 4 odabrana kružna funkcija njihanja s amplitudom 9 mm zbog potrebe za većom količinom nataljenog metala.

Za odabrani materijal i debljinu ploča 10 mm nije potrebno provoditi predgrijavanje, ali je potrebno kontrolirati temperaturu metala zavora između zavarivanja slojeva. Temperatura između prolaza mjerena je bezkontaktnim termometrom (slika 25), i nije smjela iznositi više od 120 °C prije zavarivanja slijedećeg sloja.



Slika 25: Bezkontaktni IR termometar

Tijekom zavarivanja očitavane su stvarne vrijednosti struje I i napona V , pri konstantnoj brzini zavarivanja 30 cm/min, na osnovu čega se mogla izračunati stvarna količina topline unesene u osnovni materijal. Stvarni parametri zavarivanja i vrijednost unesene topline prikazani su u tablici 10.

Tablica 10: Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja i unesene topline

Stanje pokusa	Prolaz	%CO ₂	Q , kJ/cm	I , A	U , V	v_{zav} , cm/min	Q_{stv} , kJ/cm
1	korijen	18	13	294	27,8	30	13,08
	1.			287	28	30	12,85
	2.			298	28	30	13,35
	3.			300	27,7	30	13,29
2	korijen	18	23	413	33,7	30	22,27
	1.			420	34,5	30	23,18
3	korijen	8	13	300	27	30	12,96
	1.			315	27,7	30	13,96
	2.			319	27	30	13,78
	3.			318	27,2	30	13,84
4	korijen	8	23	415	34,5	30	22,98
	1.			412	34,7	30	22,87

Nakon svakog prolaza zavarivanja provedeno je čišćenje zavora i napravljena vizualna kontrola zavora. Na slici 26 može se vidjeti da u zavaru nema površinskih nepravilnosti, kao ni pojave pukotina.



Slika 26: Lice zavora

6.9. Izrada ispitnih uzoraka

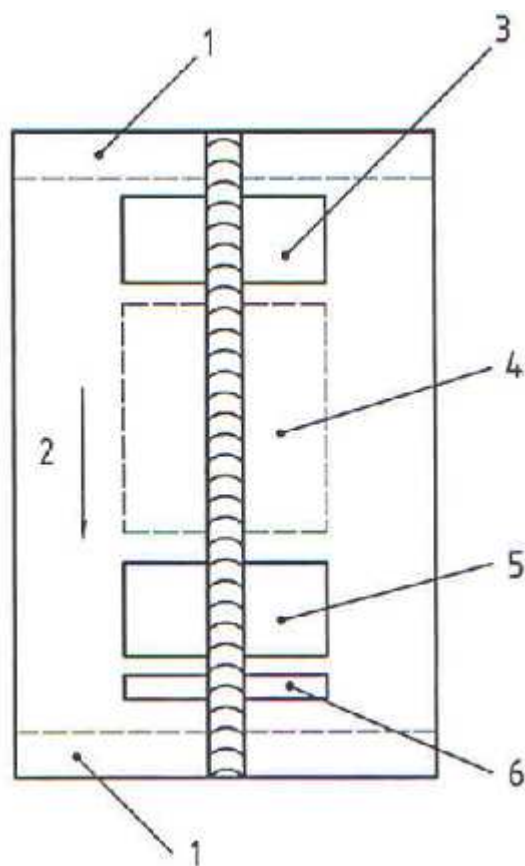
Nakon provedenih postupaka zavarivanja pristupilo se izrezivanju ispitnih uzoraka iz zavarenih ploča sukladno normi HRN EN ISO 15614-1:2007 : Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupaka zavarivanja – 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla [35]. U prvoj fazi postupka izvršilo se reduciranje širine zavarenih ploča izrezivanjem na plinskoj rezačici, čime su dobivene dimenzije ploča 350 mm x 130 mm x 10 mm, što se može vidjeti na slici 27.



Slika 27: Reduciranje širine zavarenih ploča na plinskoj rezačici

Nakon smanjivanja širine zavarenih ploča pristupilo se izrezivanju ispitnih uzoraka na tračnoj pili, u skladu sa normama HRN EN ISO 15614-1:2007 i HRN EN ISO 15792-1.

Pozicija uzimanja uzoraka može se vidjeti na slici 28.



Slika 28: Plan uzimanja uzoraka prema normi HRN EN ISO 15614-1 : 2007 [35]

Pri tome je:

1 – odbaciti 25 mm

2 – smjer zavarivanja

3 – područje za uzimanje uzoraka za vlačno ispitivanje i ispitivanje na savijanje

4 – područje za uzimanje uzoraka za udarna ispitivanja i dodatna ispitivanja

5 – područje za uzimanje uzoraka za vlačno ispitivanje i ispitivanje na savijanje

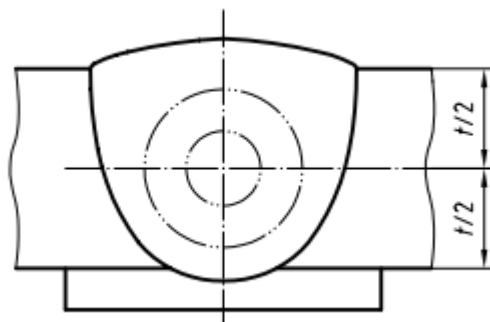
6 – područje za uzimanje makro uzorka i uzorka za ispitivanje tvrdoće

Odlučeno je da se za svako stanje pokusa izrežu tri uzorka za ispitivanje udarnog rada loma, jedan uzorak za statički vlačni pokus i jedan makro uzorak.

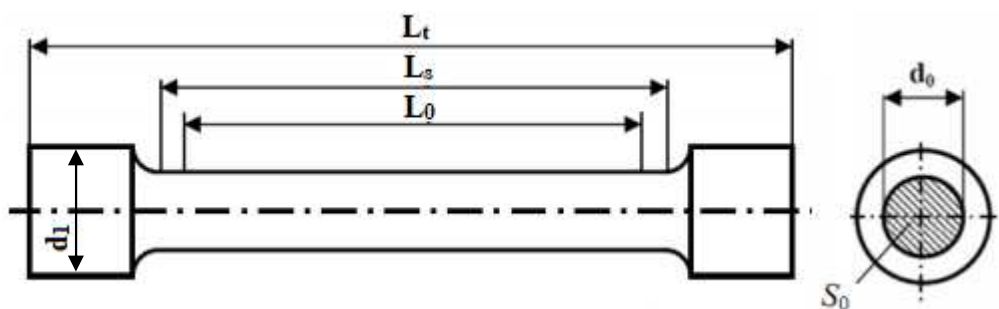
Slijedeći korak u pripremi ispitnih uzoraka bila je obrada odvajanjem čestica koja je provedena u Laboratoriju za strojnu obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorci predviđeni za ispitivanje udarnog rada loma obrađeni su postupkom glodanja, dok su epruvete za uzdužni statički vlačni pokus obrađene postupkom tokarenja. Epruveta za analizu makro uzorka obrađivala se brušenjem i poliranjem, a zatim nagrizzala u 5 % nitalu.

Položaj epruvete za uzdužni vlačni pokus na zavarenim pločama određen je u skladu sa normom HRN EN ISO 15792-1: Potrošni materijali za zavarivanje – Postupci ispitivanja – 1. dio – Postupci ispitivanja metala zavarivanja uzoraka od čelika, nikla i legura nikla [36]. Položaj epruvete u odnosu na zavarene ploče može se vidjeti na slici 29.

Dimenzije epruvete određene su normom HRN EN ISO 6892-1: 2016 – Metalni materijali – Vlačno ispitivanje – 1. dio: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi [37] i prikazane su na slici 30.



Slika 29: Položaj epruvete za statički vlačni pokus u metalu zavora [36]



Slika 30: Radionički crtež epruvete za statički vlačni pokus

Pri tome je:

$L_0 = 50 \text{ mm}$ – početna mjerna duljina ispitnog uzorka

$L_s = 53 \text{ mm}$ – stvarna duljina ispitnog uzorka

$L_t = 180 \text{ mm}$ – ukupna duljina ispitnog uzorka

$d_0 = 6 \text{ mm}$ – početni promjer ispitnog uzorka

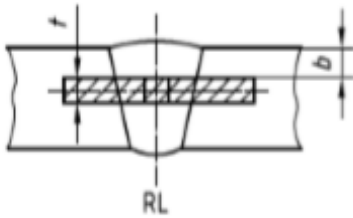
$d_1 = 9 \text{ mm}$ – promjer glave epruvete

$S_0 = 28,27 \text{ mm}^2$ – početna ploština poprečnog presjeka epruvete

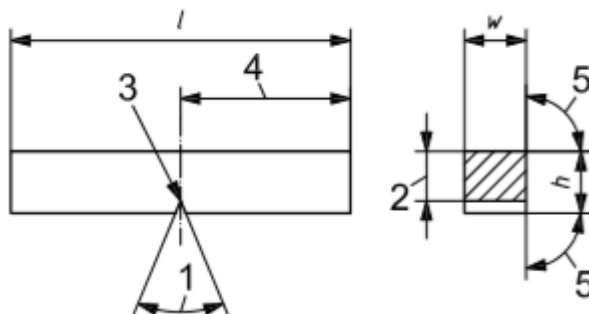
Epruvete za ispitivanje udarnog rada loma izrađene su prema normi HRN EN ISO 148-1: 2012 – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – Postupci ispitivanja [38].

Norma HRN EN ISO 9016:2013 – Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje udarnog rada loma – Položaj ispitnog uzorka, položaj zareza i ispitivanje [39], propisuje način uzimanja uzorka za ispitivanje udarnog rada loma za metal zavara i za zonu utjecaja topline. U eksperimentu se ispituje udarni rad loma za metal zavara pa se uzorci uzimaju u sredini zavarenog spoja prema oznaci VWT 0/b, kao što se može vidjeti u tablici 11.

Tablica 11: Shematski prikaz pozicioniranja epruvete i V-utora [39]

Oznaka	Položaj epruvete i V-utora u odnosu na metal zavara
VWT 0/b	

Zbog geometrijskih karakteristika poprečnog presjeka metala zavara epruvete nisu nominalne širine 10 mm, već su reducirane širine 7,5 mm. Kota b iznosila je 1 mm. Dimenzije epruvete za ispitivanje udarnog rada loma mogu se vidjeti na slici 31.



Slika 31: Dimenzije epruvete za ispitivanje udarnog rada loma [38]

Gdje je:

$l = 55 \text{ mm}$ – dužina epruvete

$h = 10 \text{ mm}$ – visina epruvete

$w = 7,5 \text{ mm}$ – reducirana širina epruvete

1 (kut zareza) = 45°

2 (visina ispod zareza) = 8 mm

3 (polumjer zakrivljenosti zareza) = $0,25 \text{ mm}$

4 (udaljenost zareza od ruba) = $27,5 \text{ mm}$

5 (kut između susjednih stranica) = 90°

6.10. Statičko vlačno ispitivanje

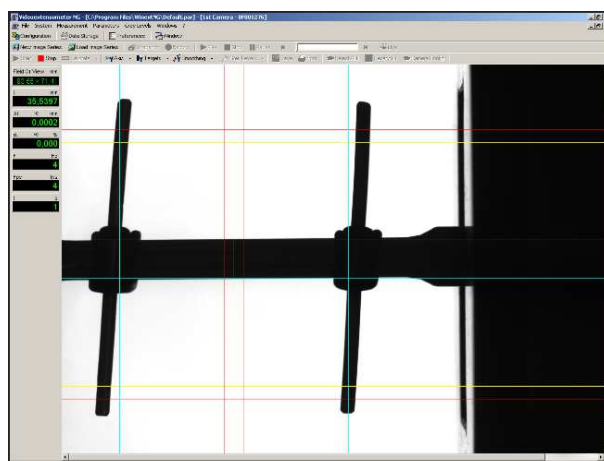
Uzdužno statičko vlačno ispitivanje metala zavara provedeno je u skladu sa normom HRN EN ISO 6892-1:2016: Metalni materijali -- Vlačno ispitivanje -- 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi [37] u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno na računalom upravljanoj servo hidrauličnoj kidalici Messphysik Beta 50-5 opremljenoj video ekstensometrom Messphysik ME46-NG i maksimalne sile 50 kN (slika 32).



Slika 32: Kidalica Messphysik Beta 50-5

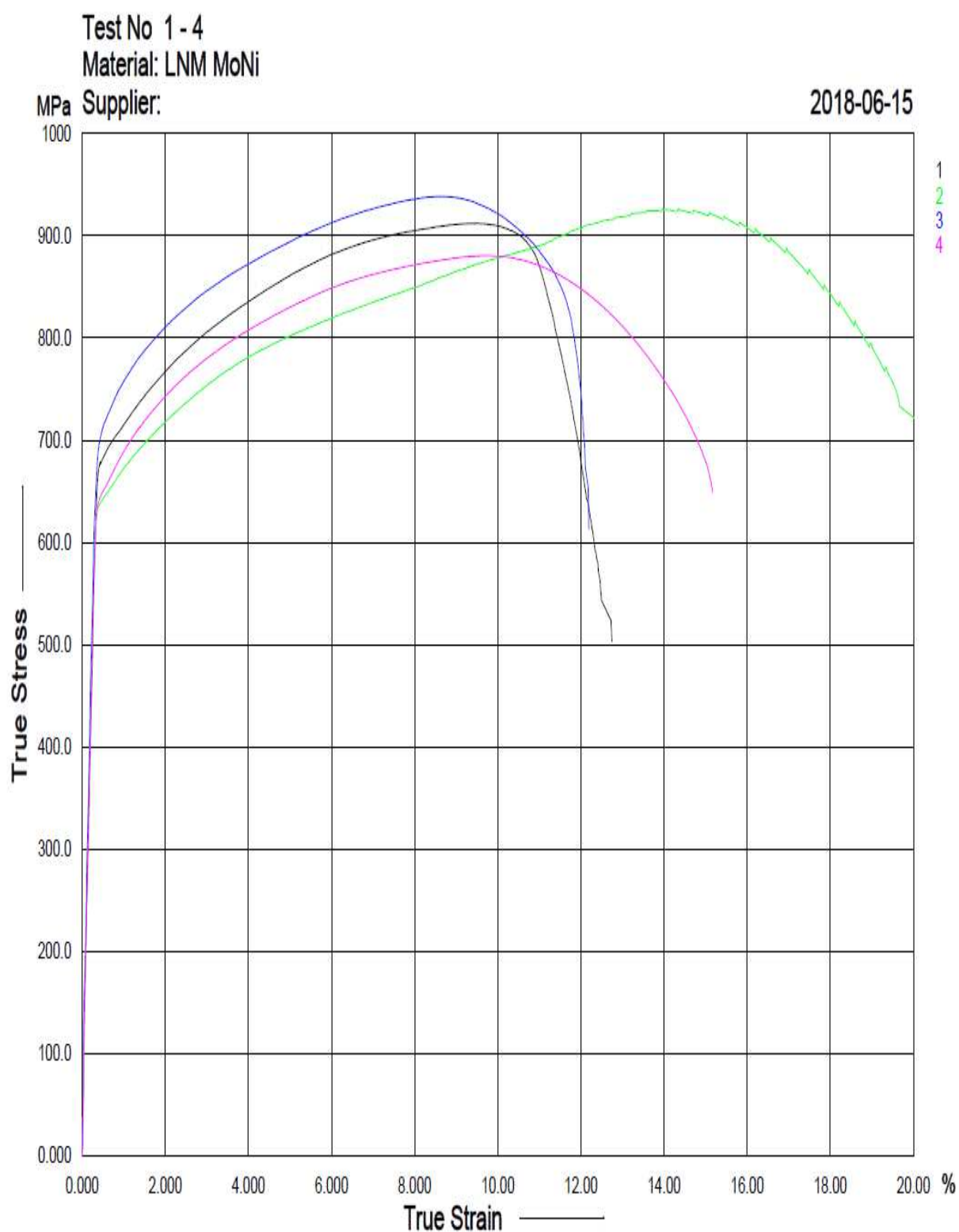
Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi pri konstantnoj brzini razvlačenja od 0,75 mm/min, a tijekom postupka mogao se i vizualno pratiti na računalu zahvaljujući video kameri montiranoj na kidalici (slika 33).

Opterećenje se na kidalici ostvaruje hidraulički, a na epruvete se pričvršćuju ekstenzimetri koji rade na elektrootporničkom principu i omogućuju preciznija mjerenja produljenja, kao i osnovna mehanička svojstva materijala (modul elastičnosti, granica razvlačenja i sl.).



Slika 33: Video prikaz postupka kidanja epruvete

Rezultati ispitivanja predloženi su tablicom 12, a dijagram kidanja slikom 34.



Slika 34: Dijagram kidanja

Tablica 12: Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Stanje pokusa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p,0,2}$, MPa	Istezanje A , %
1	847,8	688	13,34
2	786,4	641,2	22,05
3	870,3	715,4	12,69
4	813,6	651,9	16,07
Srednja vrijednost	829,5	674,1	16,04

Iako veličina uzorka od četiri epruvete nije dovoljna za donošenje statistički značajnih ocjena, na osnovu dobivenih rezultata može se primijetiti da osnovna mehanička svojstva, kao što su vlačna čvrstoća R_m i konvencionalna granica razvlačenja $R_{p,0,2}$, zadovoljavaju navode proizvođača dodatnog materijala, dok su vrijednosti istezanja A ipak nešto niža od garantiranih.

Na slici 35 mogu se vidjeti sve četiri epruvete nakon završenog vlačnog ispitivanja. Kao što se i očekivalo, sve epruvete imaju lom na ispitnom promjeru d_0 , iako se može dogoditi da epruveta ima lom na promjeru glave d_1 uslijed greške u metalu zavara.



Slika 35: Epruvete nakon provedenog ispitivanja na kidalici

6.11. Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je na Charpyjevom batu maksimalne energije udara 350 J u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno sukladno normi HRN EN ISO 148-1:2012 Metalni materijali – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – 1. dio: postupci ispitivanja[38].

Ispitivanje je provedeno na temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, a zahtijevana temperatura postignuta je uranjanjem ispitnih uzoraka u kupku suhog leda i etilnog alkohola (slika 36). Temperatura uzoraka kontrolirala se kontaktnim termometrom.

Uzorci se pothlađuju na temperaturu $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ kako bi se prilikom ispitivanja osigurala normom zahtijevana temperatura $-40 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pothlađeni uzorci moraju se namjestiti pod pravim kutem u odnosu na nakovanj ispitnog uređaja, s ravninom simetrije utora unutar 0,5 mm u odnosu na sredinu nakovnja. Na slici 36 prikazano je namještanje ispitnog uzorka na nakovanj uređaja.



Slika 36: Namještanje ispitnog uzorka na nakovanj uređaja

U tablici 13 prikazani su rezultati ispitivanja udarnog rada loma metala zavora. Za svako stanje pokusa provedena su tri ispitivanja, a u posljednjem stupcu su navedene srednje vrijednosti udarnog rada loma.

Tablica 13: Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

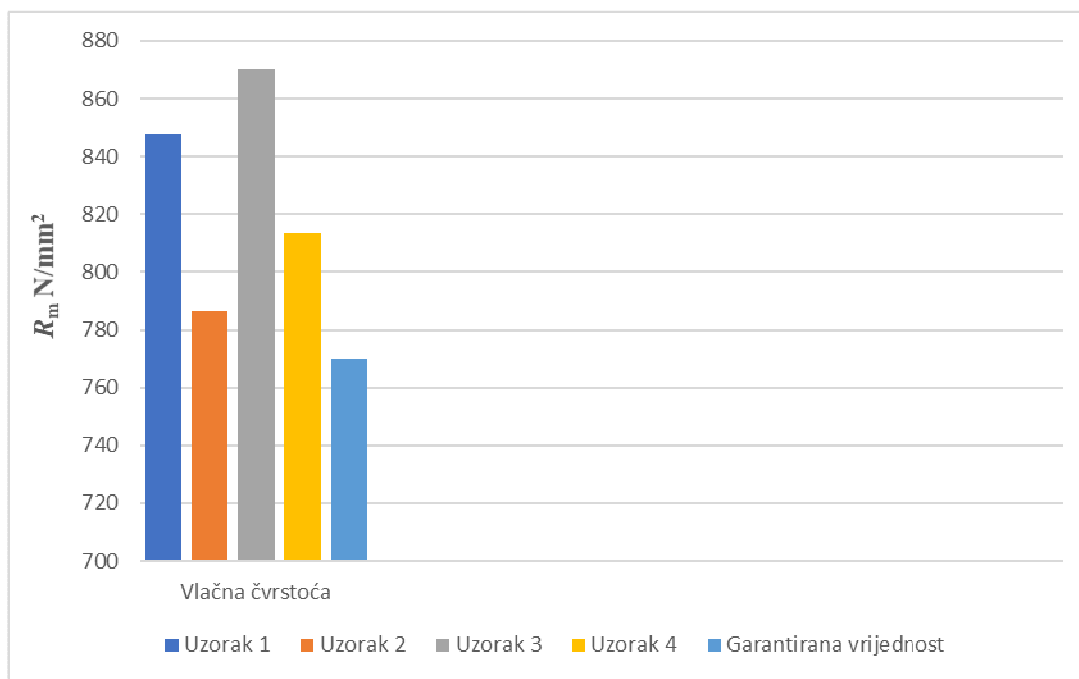
Stanje pokusa	%CO ₂	Q_{sred} , kJ/cm	KV, J	KV_{sred} , J
1	18	13,14	46	52
			66	
			44	
2	18	22,73	44	60
			62	
			74	
3	8	13,63	53	46,33
			38	
			48	
4	8	22,93	32	28
			18	
			34	

7. ANALIZA REZULTATA

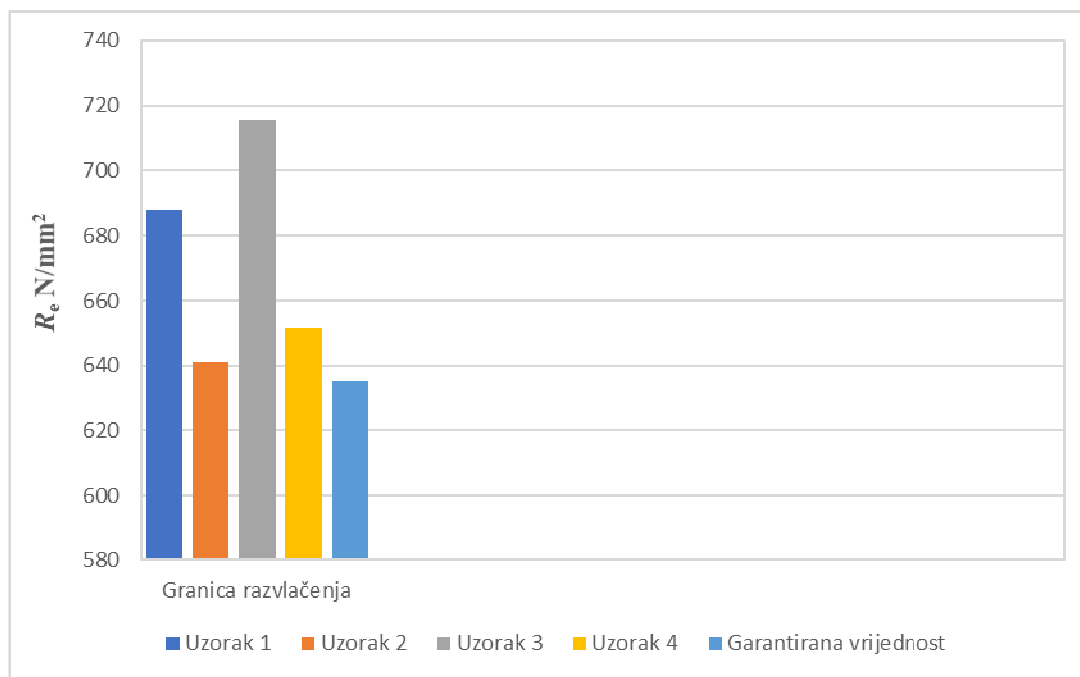
7.1. Analiza rezultata statičkog vlačnog pokusa

Rezultati dobiveni ispitivanjem mehaničkih svojstava metala zavara uspoređeni su sa vrijednostima koje jamči proizvođač dodatnog materijala, žice za MAG zavarivanje LNM MoNi, Lincoln Electric.

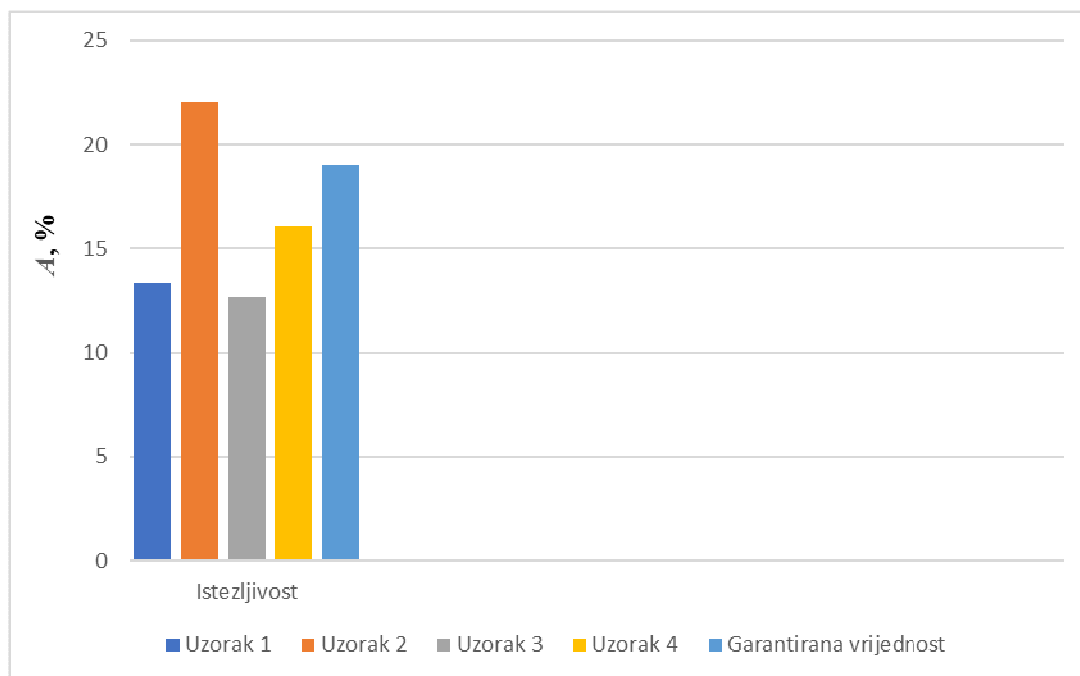
Na slikama 37, 38 i 39 prikazane su izmjerene vrijednosti vlačne čvrstoće R_m , granice razvlačenja R_e i istezljivosti A za sva četiri stanja pokusa, u komparaciji sa vrijednostima garantiranima od strane proizvođača.



Slika 37: Izmjerene i garantirana vrijednost vlačne čvrstoće



Slika 38: Izmjerene i garantirana vrijednost granice razvlačenja



Slika 39: Izmjerene i garantirana vrijednost istezljivosti

Vlačna čvrstoća i granica razvlačenja:

Na osnovu dobivenih rezultata može se ustanoviti da su vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja više od vrijednosti koje jamči proizvođač. Također, uočljiva je korelacija između navedenih mehaničkih svojstava i količine unesene topline. Uzorci 1 i 3, sa nižim unosom topline ($Q = 13$ kJ/cm), imaju značajno višu vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja u odnosu na uzorke 2 i 4 sa višim unosom topline ($Q = 23$ kJ/cm). Kod uzoraka sa istim unosom topline u oba slučaja nešto više vrijednosti postignute su korištenjem mješavine sa 8 % CO₂, iako ta razlika nije toliko izražena kao u slučaju unesenih toplina. Na uzorku od četiri epruvete može se zaključiti da se najviša vrijednost vlačne čvrstoće i granice razvlačenja postigla sa manjim unosom topline i u zaštiti plinske mješavine sa 8 % CO₂, što je i u skladu s očekivanjem.

Istezljivost:

Kad je riječ o istezljivosti, rezultati pokazuju nešto posve suprotno. Bolje rezultate pokazuju uzorci sa višom količinom unesene topline, a najvišu vrijednost istezljivosti ima uzorak 2 kod kojeg je uz veći unos topline korištena mješavina sa 18 % CO₂. To je ujedno i jedini uzorak kod kojeg je istezljivost viša od garantirane.

7.2. Analiza rezultata udarnog rada loma

Poznato je da visokočvrsti čelici za sve temperature ispitivanja imaju niski rad loma i da pucaju krhko na svim temperaturama. Proizvođač dodatnog materijala garantira vrijednost udarnog rada loma 90 J na temperaturi -40 °C, ali rezultati dobiveni ispitivanjem na Charpyjevom batu pokazuju daleko niže vrijednosti. Razlog za to vjerojatno leži i u činjenici da su pri ispitivanju korištene epruvete reducirane širine, pa usporedba dobivenih rezultata sa nominalnom vrijednosti udarnog rada loma od 90 J i nema previše smisla.

Zbog tog razloga, u daljnjoj analizi pažnja će se posvetiti utjecaju parametara zavarivanja na udarni rad loma, čime je eliminiran utjecaj dimenzija epruveta na rezultate dobivene ispitivanjem.

Na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem može se zaključiti da pri korištenju zaštitnog plina sa 18 % CO₂ unos topline ne utječe značajno na vrijednost udarnog rada loma. To nije u skladu s navodima iz literature koji tvrde povećanje unosa topline u zavar rezultira padom žilavosti. Međutim, rezultati dobiveni sa mješavinom koja sadrži 8 % CO₂ potvrđuju navode iz literature, jer je kod tih uzoraka jasno vidljiv značajan pad vrijednosti udarnog rada loma sa povećanjem unosa topline.

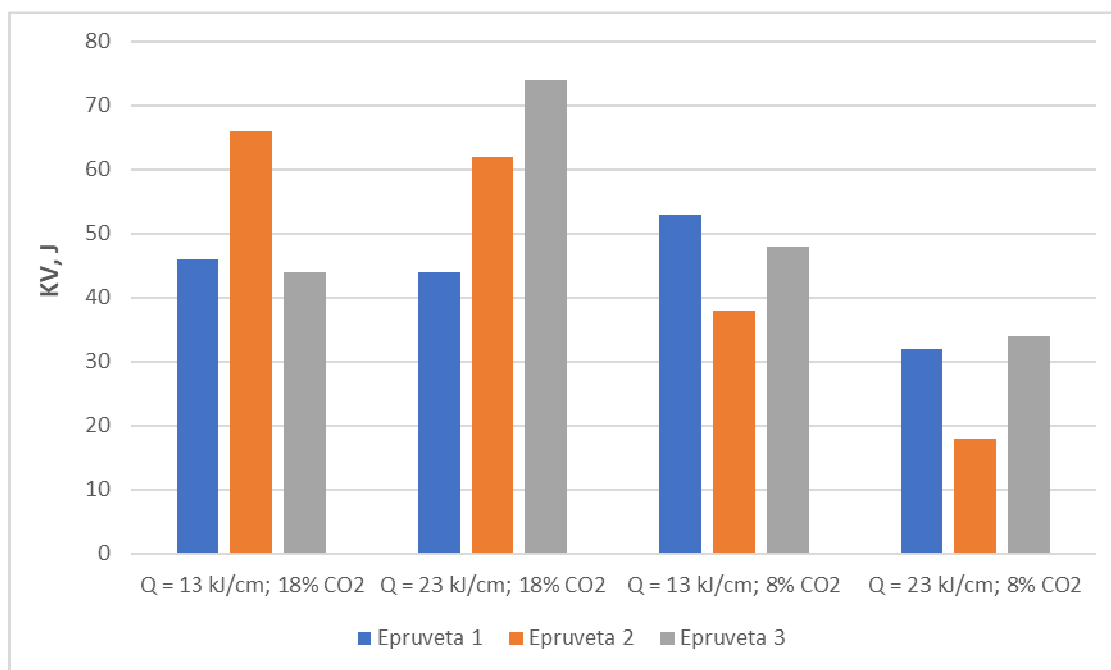
Također, može se primijetiti da kod uzoraka sa nižim unosom topline vrsta zaštitnog plina ne utječe značajno na vrijednost udarnog rada loma, dok, naprotiv, promjena zaštitne mješavine kod uzoraka sa višim unosom topline značajno utječe na pad njegove vrijednosti.

Sumirajući sve navedeno, može se zaključiti da su najbolji rezultati dobiveni kod uzoraka sa višim unosom topline u zaštiti mješavine sa 18 % CO₂, dok su daleko najlošiji rezultati dobiveni kod uzoraka sa višim unosom topline i mješavinom sa 8 % CO₂.

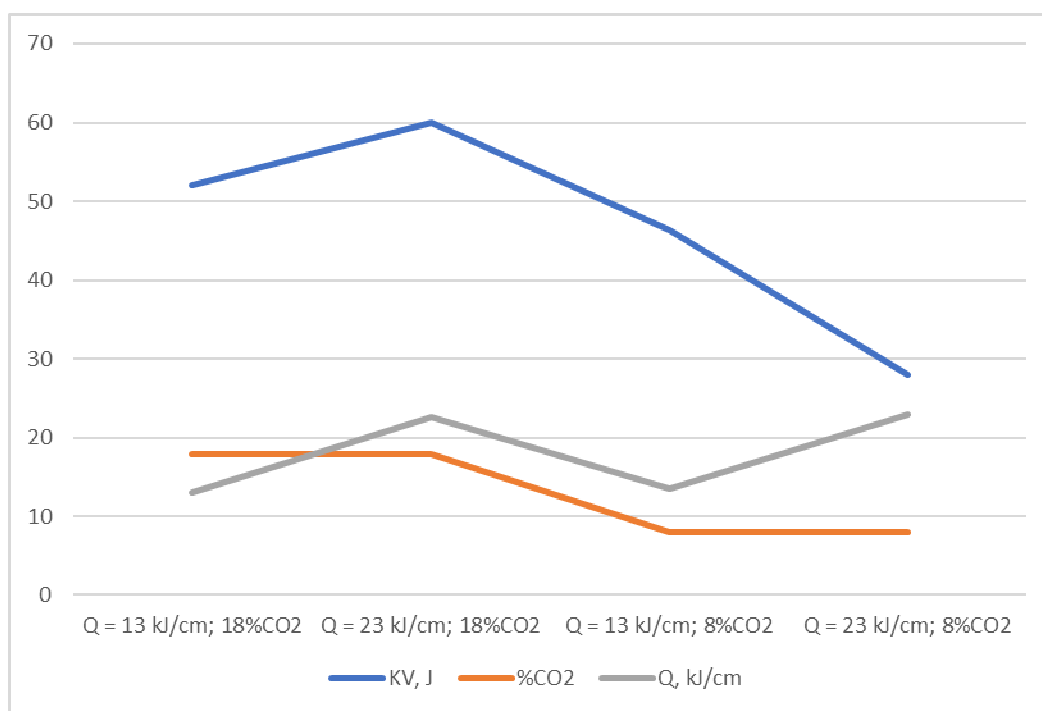
Prema tome, rezultati eksperimenta upućuju na zaključak da veći utjecaj na vrijednost udarnog rada loma ima izbor zaštitne mješavine nego količina u zavar unesene topline.

Treba napomenuti da značajno odstupanje rezultata 4. stanja pokusa od ostalih može biti rezultat mogućih grešaka u metalu zavara i pogoršanja mehaničkih svojstava metala zavara lokalnog karaktera, kao i eventualnih odstupanja prilikom pripreme uzoraka i izvođenja ispitivanja. Kako bi rezultati ispitivanja mogli biti osnova za donošenje sigurnijih zaključaka, broj uzoraka trebao bi biti puno veći, a bio bi dobiven primjenom statističkih proračuna.

Na slikama 40 i 41 prikazani su rezultati dobiveni ispitivanjem udarnog rada loma, kao i utjecaj parametara zavarivanja na udarni rad loma.



Slika 40: Rezultati ispitivanja udarnog rada loma



Slika 41: Utjecaj parametara zavarivanja na udarni rad loma metala zavora

7.3. Analiza makro uzorka


Za makroanalizu zavarenog spoja uzorci su nagriženi 5%-tnim nitalom (5% HNO_3 + 95 % metanol). Nakon nagrizanja uzorci su u vrućoj vodi, a zatim osušeni sušilom kako bi se uklonili svi tragovi vlage. Nagrizanjem je dobiven dobar izgled makro strukture metala zavora, zone utjecaja topline i osnovnog materijala, kao i linija staljivanja.


Na slikama u tablici 14 prikazani su poprečni presjeci za sva četiri stanja pokusa na kojima su izmjerene širine zavora i ZUT-a. Vizualnim ispitivanjem može se primjetiti ujednačena struktura bez pogrubljenja zrna bilo u metalu zavora, bilo u području ZUT-a.


Pregledom makro strukture zavarenih spojeva nisu uočene pukotine niti na jednom uzorku, ali ovakvom analizom ne može se isključiti mogućnost mikro pukotina.


Izgled poprečnih presjeka svih uzoraka ukazuje da različiti parametri zavarivanja nisu značajno utjecali na geometriju zavarenog spoja.

Tablica 14: Poprečni presjeci zavara svih stanja pokusa

		Poprečni presjek zavara
Stanje pokusa	1	
Broj prolaza	4	
Širina zavara, mm	21,92	
Širina ZUT-a, mm	25,77	

		Poprečni presjek zavara
Stanje pokusa	2	
Broj prolaza	2	
Širina zavara, mm	20,19	
Širina ZUT-a, mm	26,15	

		Poprečni presjek zavara
Stanje pokusa	3	
Broj prolaza	4	
Širina zavara, mm	27,95	
Širina ZUT-a mm	31,67	

		Poprečni presjek zavara
Stanje pokusa	4	
Broj prolaza	2	
Širina zavara, mm	22,80	
Širina ZUT-a, mm	26,20	

8. ZAKLJUČAK

Osnovna svrha ovog diplomskog rada bila je istražiti utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva TMCP čelika API 5L X80, s posebnim osvrtom na utjecaj unesene topline i vrste zaštitnog plina na mehanička svojstva metala zavara. U tu svrhu provedeno je istraživanje koje je uključivalo planiranje pokusa, izradu ispitnih uzoraka, laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava, kao i analizu makro uzoraka.

Na temelju plana pokusa određeni su parametri zavarivanja, a zatim su izrađeni zavareni spojevi iz ploča čelika API 5L X80 MAG postupkom zavarivanja, korištenjem robotske jedinice za zavarivanje Almega AX-V6 i žice LNM MoNi proizvođača Lincoln Electric. Vizualnom kontrolom zavarenih spojeva nisu uočene površinske nepravilnosti i pukotine, čime su ostvareni uvjeti za nastavak istraživanja i planirana laboratorijska ispitivanja.

Ispitivanje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i istezanja provedeno je sukladno važećoj normi za uzdužni vlačni pokus, na sobnoj temperaturi. Tijekom ispitivanja utvrđeno je da su vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ i vlačne čvrstoće R_m kod svih uzoraka veće od navedenih od proizvođača dodatnog materijala, neovisno o vrijednostima i kombinacijama parametara zavarivanja. Također, ustanovljeno je da su vrijednosti istezanja na tri od četiri ispitivana uzorka manje od garantiranih i to u rasponu od 15,4 % do 33,2 %.

Ispitivanje udarnog rada loma metala zavara provedeno je sukladno važećoj normi na temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ispitivane su po tri epruvete za svako stanje pokusa, a dobivene vrijednosti su značajno niže od vrijednosti udarnog rada loma u atestu dodatnog materijala. Prosječne vrijednosti udarnog rada loma za sva četiri stanja pokusa bile su niže od garantiranih u rasponu od 33,33 % pa sve do 68,89 %. Potrebno je napomenuti da na dobivene rezultate svakako utječe i korištenje epruveta širine reducirane sa 10 mm na 7,5 mm.

Analiza rezultata dobivenih ispitivanjima pokazala je da postoji značajan utjecaj parametara zavarivanja na mehanička svojstva metala zavara. To se naročito odnosi na utjecaj unesene topline na vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja, koje su značajno više kod nižeg unosa topline. Također, može se primijetiti da su navedena mehanička svojstva bolja pri upotrebi zaštitne mješavine sa 8 % CO_2 , ali te razlike nisu toliko naglašene.

Kad se radi o istezanju, može se primijetiti da su dobivene vrijednosti značajno više kod uzoraka sa većim unosom topline. Korištenjem mješavine s 18 % CO_2 također se postižu nešto bolji rezultati, ali i ovdje su razlike u odnosu na mješavinu sa 8 % CO_2 manje naglašene.

Na temelju provedenih ispitivanja i analize rezultata dobivenih eksperimentom možemo donijeti zaključak da ispitivani čelik X80 spada u skupinu dobro zavarljivih čelika. Na makro uzorcima nisu uočene greške, niti u zoni taljenja, niti u zoni utjecaja topline.

Ovaj čelik pripada skupini visokočvrstih čelika koji su osjetljivi na pojavu hladnih pukotina uzrokovanih vodikom, ali pravilnim odabirom dodatnog materijala, pažljivo reguliranim unosom topline u zavar, te striktnim pridržavanjem zadanih parametara zavarivanja i tehnike

rada moguće je ostvariti zavareni spoj koji može podnijeti visoka naprezanja za koja je čelik API 5L X80 i predviđen.

9. LITERATURA

- [1] J. Kampulainen: „MAG zavarivanje ultračvrstih čelika“, časopis Zavarivanje, 2012.
- [2] V. Sikiričić, S. Kralj: „Zavarljivost visokočvrstih čelika“, časopis Zavarivanje, 2001.
- [3] S. Kralj, Z. Kožuh, I. Garašić, T. Tomić: „Sklonost čelika API 5L X80 prema hladnim pukotinama“, časopis Zavarivanje, 2012.
- [4] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: „Svojstva i primjena materijala“, Zagreb, 2002.
- [5] S. Kožuh: „Specijalni čelici“, Sisak, 2010.
- [6] I. Garašić: „Čelici visoke čvrstoće – razvoj i primjena“, časopis Zavarivanje, 2010
- [7] M. Novosel, S. Kralj: „Etapе razvoja čelika povišene čvrstoće“, časopis Zavarivanje, 1994.
- [8] M. Novosel, S. Kralj: „Čelici povišene i visoke čvrstoće“, časopis Zavarivanje, 1991.
- [9] I. Rak, V. Gliha: „Zavarljivost konstrukcijskih čelika sa povišenom čvrstoćom i žilavošću za složena opterećenja“, časopis Zavarivanje, 1989.
- [10] I. Juraga, K. Ljubić, M. Živčić, I. Garašić: „Pogreške u zavarenim spojevima“, Zagreb, 2015.
- [11] M. Gojić: „Tehnike spajanja i razdvajanja materijala“, Sisak, 2008.
- [12] I. Žakić, I. Mustapić, I. Samardžić: „Usvajanje tehnologije zavarivanja visokočvrstog čelika S 960 QL“, 6. Međunarodno-znanstveno savjetovanje, Slavonski Brod, 2011.
- [13] HRN EN ISO 17642-1;2008 - Ispitivanja zavara razornim metodama na metalnim materijalima - Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva hladnim pukotinama - Elektrolučni postupci zavarivanja.
- [14] I. Garašić: „Izračun i određivanje unosa topline – razlike i specifičnosti kod primjene normi EN i ASME“, časopis Zavarivanje, 2010.
- [15] http://www.wikiwand.com/sh/Zavarivanje_MAG_postupkom, rujan, 2017.
- [16] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>, rujan, 2017.
- [17] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić: „Zavarivački i srodni postupci“, Zagreb, 2015.

- [18] HRN EN ISO 16834:2013 – Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje sa zaštitom plina za čelike visoke čvrstoće – Razredba
- [19] HRN EN ISO 14175:2008 : Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke
- [20] D. Kolednjak: „Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, Sveučilište u Zagrebu – FSB, doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [21] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarc-56/c4200.pdf, lipanj 2018.
- [22] B. Despotović, B. Brechelmacher, T. Marsenić: „Neka gledišta u primjeni punjenih žica za MAG postupak zavarivanja“, časopis Zavarivanje, 1999.
- [23] J. Velagić: „Uvod u robotiku“, Laboratorij za robotiku i autonomne sisteme
- [24] D. Radočaj, M. Jurica, S. Kos, T. Pavlic: „Programiranje industrijskih robota za potrebe robotiziranog zavarivanja“, časopis Zavarivanje, 2016.
- [25] M. Crneković: „Industrijski i mobilni roboti“, predavanja, FSB Zagreb, 2016
- [26] D. Kantolić: Završni rad, FSB Zagreb, 2018.
- [27] I. Ciglar, Z. Botak: „Upravljanje i primjena robota za zavarivanje REIS ROBOTICS RV6L“, Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, 2011.
- [28] <https://www.fanuc.eu/dk/en/robots/robot-filter-page/arc-welding/arcmate-100ic-12>, lipanj 2018.
- [29] M. Olsson: „Simulation and execution of autonomous robot systems“, Department of Mechanical Engineering, Lund University, Lund, Sweden, 2002.
- [30] T. Tomić Kovačević: „Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80“, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [31] J. Alešković: „Utjecaj svojstava žice na kvalitetu MAG zavarivanja“, časopis Zavarivanje, 2013.
- [32] Dž. Kudumović: „Zavarivanje i termička obrada“, Univerzitet u Tuzli, Fakultet elektrotehnike i mašinstva, Tuzla, 1998.

- [33] M. Franz: „Mehanička svojstva materijala“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [34] HRN EN ISO 4063:2012 – Zavarivanje i srodni postupci – Nomenklatura postupka i referentni brojevi
- [35] HRN EN ISO 15614-1:2007 : Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupaka zavarivanja – 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla
- [36] HRN EN ISO 15792-1: Potrošni materijali za zavarivanje – Postupci ispitivanja – 1. dio – Postupci ispitivanja metala zavara uzoraka od čelika, nikla i legura nikla
- [37] HRN EN ISO 6892-1: 2016 – Metalni materijali – Vlačno ispitivanje – 1. dio: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi
- [38] HRN EN ISO 148-1: 2012 – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – Postupci ispitivanja
- [39] HRN EN ISO 9016:2013 – Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje udarnog rada loma – Položaj ispitnog uzorka, položaj zareza i ispitivanje

Prilog I

Certifikat žice za zavarivanje

LOW ALLOY SOLID WIRE

LNM MoNi

CLASSIFICATION

AWS A5.28	ER100S-G	A-Nr	12
EN ISO 16834-A	G 62 4 M Mn3NiCrMo	F-Nr	6
		9606 FM	2

GENERAL DESCRIPTION

Solid wire for welding high strength steels with a yield up to 620 Mpa
Good Impact values at -40 °C

WELDING POSITIONS (ISO/ASME)



PA/1G



PB/2F



PC/2G



PD/4F



PE/4G



PF/3Gu

SHIELDING GASES (ACC. ISO 14175)

M21 Mixed gas Ar+ >15-25% CO₂

CHEMICAL COMPOSITION (W%) TYPICAL WIRE

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
0.10	1.65	0.75	0.55	0.60	0.30	0.08

MECHANICAL PROPERTIES, TYPICAL, ALL WELD METAL

	Shielding gas	Condition	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Impact ISO-V(J)		
						-20°C	-40°C	-60°C
Typical values	M21	AW	635	770	19	100	90	70

EXAMPLES OF MATERIALS TO BE WELDED

Steel grades	Standard	Type
Pipe material	API-5LX	X65, X70, X80
	EN 10208-2	L480, L550
Fine grained steels	EN 10025 part 6	S460, S500, S550, S620
		S620GH, S600MC, TstE620, Weldox 500, Hardox

PACKAGING AND AVAILABLE SIZES

Diameter (mm)	1.0	1.2
16 kg spool B300	X	X

Other sizes and packaging on request

LNM MoNi res C-ENISO-09000



THE WELDING EXPERTS®

All information in this data sheet is accurate to the best of our knowledge at the time of printing. Please refer to www.lincolnelectric.eu for any updated information.
Download Safety datasheets (SDS)

www.lincolnelectric.eu

Prilog II

Certifikat uzdužnog vlačnog pokusa

MESSPHYSIK Materials Testing.

Test Certificate

Metals Tensile Test

Tester.....Martin Surjak
Material.....LNM MoNi

Tested on.....2018-06-15

Testing machine.....Beta 50-5
Axial extensometer.....ME46-NG
Transversal extensometer...ME46-NG
Pretension.....1 N
Gripped length.....94 mm
Test speed 1.....0 % -> 1 mm/min

Directory.....Hrgar_dipl
Parameter set.....True_stress_strain

Legend

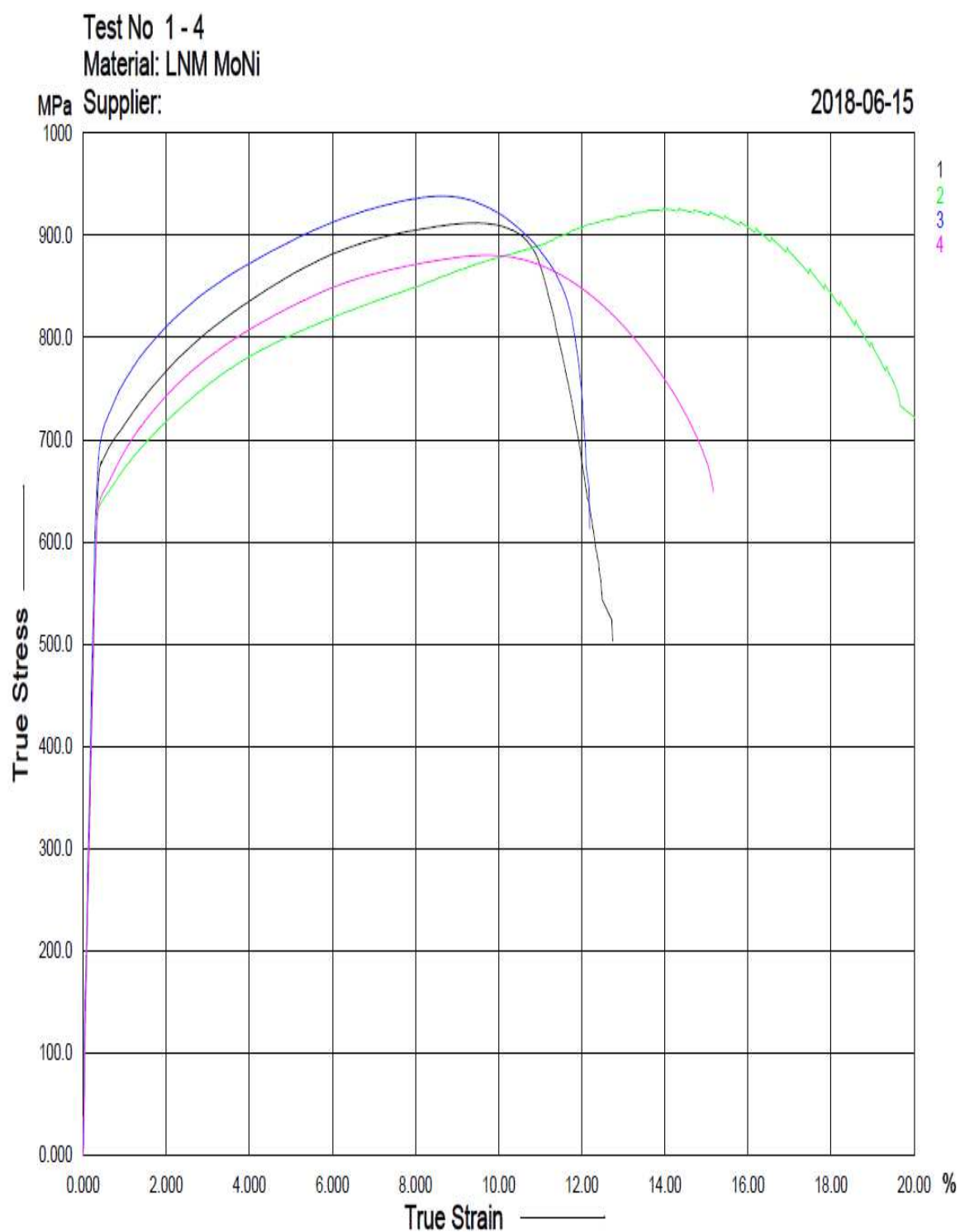
BNo.....Batch number
Fm.....Maximum load
E.....E-Modulus
Rm.....Tensile strength
Rp0.2.....Proof stress at 0.2%

A.....Breaking elongation
Ag.....Uniform elongation
Agt.....Total uniform elongation
At.....Total breaking elongation

Test No	BNo	Fm N	E GPa	Rm MPa	Rp0.2 MPa	A %	Ag %	Agt %	At %
1	1	23179	183.1	847.8	688.0	13.34	8.898	9.361	13.59
2	2	20778	202.3	786.4	641.2	22.05	10.42	10.81	22.31
3	3	22993	208.9	870.3	715.4	12.69	7.913	8.333	12.96
4	4	22243	191.5	813.6	651.9	16.07	9.124	9.548	16.38
Mean:		22298	195.9	829.5	674.1	16.04	9.089	9.513	16.31
Std.dev.:		1092	10.73	37.01	34.03	4.267	1.032	1.016	4.267

Prilog III

Dijagram naprezanje - istezanje



Prilog IV

CD